

MEMORIA TÉCNICA

Aportes a la gestión integrada de cuencas hídricas

Metodologías, herramientas y resultados de experiencias en cuencas del Sistema Agroalimentario Argentino

COMPILADORES: Carolina Aumassanne; Maira Guiñazú y Roberto Esteban Miguel



Aportes a la gestión integrada de cuencas hídricas

Metodologías, herramientas y resultados de experiencias en cuencas del Sistema Agroalimentario Argentino

Memoria técnica

Proyecto estructural Aportes para la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) en cuencas del Sistema Agroalimentario Argentino

COMPILADORES

Aumassanne, Carolina M.

Guiñazú, Maira

Miguel, Roberto Esteban



Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria

Secretaría de Agricultura,
Ganadería y Pesca



Ministerio de Economía
Argentina

Centro Regional La Pampa-San Luis

Estación Experimental Agropecuaria Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas"

LISTA DE AUTORES

Almonacid Leandro R.

Álvarez Javier

Anschau Alicia

Aramayo Valeria

Aumassanne Carolina M.

Barrionuevo Néstor

Bartel Andrea

Basán Nickisch Mario Héctor

Beget María Eugenia

Bodoque José M

Bonilla Jorge

Buccella Agustina

Castellano Jorge

Castiglioni Mario

Cechich Alejandra

Clemares Nicolás

Colombani Erica N.

Corigliano José

Cremona María Victoria

Díaz Boris G.

Díaz Lucas

Dunel Guerra Luciana G.

Durzo Juan Pablo

Enriquez Andrea

Espindola Aime

Feler María V.

Fernández Darío

Fernández Roberto

Fiorini Correa Julio G.

Fontanella Dardo

García Falabella Brenda

García Marcelo

Gattinoni Natalia

González Javier

González Ribot Joaquín

Víctor

Guillén Nicolás

Guiñazu Maira

Gusmerotti Lucas

Havrylenko Sofia B.

Hernandez Marcos

Herrada Javier

Holzman Mauro

Laghi Joana

Lavanderos Becerra Débora

María

Levatino Belén

Lisa Juan Carlos

López Sebastián

Macchiavello Alejandra

Machado Federico

Mañueco Lucía

Masseroni María Lujan

Miguel Roberto Esteban

Moltoni Andrés F.

Monserat Cecilia

Montenegro Ayelen

Muñoz Ángel

Nosetto Marcelo D.

Oricchio Patricio

Ortega Laura

Perez María Micaela

Peri Pablo L.

Pessacg Natalia L.

Pizzolato Roberto Daniel

Ramis Vanesa

Rodríguez Andrea

Rodríguez Corina Iris

Romero Verastegui Betsy

Sabio Milton N.

Salcedo Ana Paula

Salvadores Franco

Sánchez Luciano Emilio

Sartor Paolo

Silva Santiago Hernán

Soldano Álvaro

Solorza Romina

Spinazzola Emilio

Storniolo Romina

Teverovsky Sofia

Tosolini Rubén Américo

Van Meer Howard

Vanzolini Juan Ignacio

Varela Ayelen

Veldhuizen Ab Kroon Timo

Videla-Mensegue Horacio

Vitale Gutierrez Javier

Alejandro

Vuksinic Evelyn

Colaboradora y Curadora de Datos del Repositorio Institucional - INTA Digital

Bibl. Flavia Epuñan

Diseño Gráfico

Dis. Gráf. Francisco Etchart

Aportes a la gestión integrada de cuencas hídricas: metodologías, herramientas y resultados de experiencias en cuencas del Sistema Agroalimentario Argentino / Leandro R. Almonacid ... [et al.] ; Contribuciones de Flavia Epuñan ; compilación de Carolina Aumassanne, ; Maira Soledad Guiñazú Micames ; Roberto Esteban Miguel. - 1a ed compendiada. - Neuquen : Maira Soledad Guiñazú Micames, 2023.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-631-00-0308-5

1. Agua. 2. Cuencas Hidrográficas. I. Almonacid, Leandro R. II. Epuñan, Flavia, colab. III. Aumassanne, Carolina, comp. IV. Guiñazú Micames, Maira Soledad, comp. V. Miguel, Roberto Esteban, comp.
CDD 546.22

Este documento queda sujeto al cumplimiento de la Ley Nro. 26.899

Agosto de 2023



EDICIONES INTA

Centro Regional La Pampa-San Luis

EEA INTA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas"

RN N°5 Km 580, CP 6326, Anguil, La Pampa, Argentina

PROLOGO

Desde el año 2019 el Proyecto Estructural “Aportes para la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) en cuencas del Sistema Agroalimentario Argentino”, ha desarrollado acciones de investigación, transferencia de conocimientos y tecnología, y articulación interinstitucional. Su objetivo fue, a escala de cuenca hidrológica, promover la gestión y el desarrollo coordinados del agua, el suelo y los otros recursos relacionados, con el fin de maximizar los resultados económicos y el bienestar social de forma equitativa y sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales.

En un proyecto donde se apunta a contribuir en la búsqueda de respuestas sobre problemas y oportunidades, donde se requieren soluciones tecnológicas transferibles al medio, una de las principales formas de hacer visible y accesible los resultados es mediante publicaciones técnicas y científicas.

La presente publicación es una compilación de avances técnicos y experiencias desarrolladas en el Proyecto, que sintetizan parte de los principales adelantos y logros durante su desarrollo. En diferentes formatos, se exponen aquí trabajos presentados en talleres, congresos, seminarios, revistas, entre otros, como también la descripción de instrumental desarrollado, y experiencias de capacitación en territorio.

En cada uno de los productos incluidos en esta publicación queda expresado la dedicación y el esfuerzo innovador de los diferentes equipos de trabajo que integran el Proyecto, en cada una de las unidades INTA que lo conforman.

Marino M. Puricelli

Coordinador del Proyecto

CONTENIDOS

Introducción	5	Análisis temporal de la calidad del agua para riego en la cuenca media del río Colorado	28
1. GOBERNANZA Y GESTIÓN DEL AGUA			
Mesa del agua como herramienta para la gestión integrada del agua	7	Recarga artificial del acuífero libre con agua de lluvia para ganadería bovina en el noroeste santafesino	30
Informe hidrometeorológico de la cuenca del río Colorado: un instrumento para la toma de decisión	8	Estimación de la vulnerabilidad y peligro de contaminación del agua subterránea asociado a producciones agroindustriales	32
La articulación interinstitucional y la gestión integrada de cuencas: estudio de caso en el río Colorado, Argentina	9		
Red público-privada de monitoreo de agua subterránea en el Valle Central Antinaco-Los Colorados	11		
Tensiones y desafíos para la gestión del agua en el Valle Inferior del Río Chubut	12		
Construcción colectiva de conocimiento para la protección de manantiales en Vichigasta, La Rioja	14		
Prospectiva de la Cuenca del Río Tunuyán Superior: escenarios y hoja de ruta al 2030	15		
2. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA			
Cambios en propiedades físicas del suelo de estepas en pastoreo que afectan su comportamiento hidrológico	18		
Análisis temporal de las sequías en la provincia de Santa Cruz	19		
Estudio y caracterización de sedimentos del agua del río Colorado, Argentina	20		
Comportamiento en el largo plazo de la erosividad de las lluvias en Buenos Aires (norte)	22		
Respuesta hidrológica en una microcuenca agrícola frente a dos escenarios de humedad de suelo contrastantes	23		
Proceso de evaluación y rediseño de un prototipo de estación de monitoreo hidrológico	24		
Tendencias recientes en las lluvias de la Patagonia Austral	26		
Efecto de la intensificación en la secuencia de cultivos sobre algunas propiedades edáficas	27		
		3. MODELACIÓN, TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	
		¿Existe erosión hídrica en zonas áridas? Aplicación del modelo USLE en Patagonia	35
		Características de las precipitaciones en zonas áridas de la Patagonia Norte, Argentina	36
		Caracterización morfométrica como entorno de la erosión hídrica en la cuenca alta del arroyo Comallo (Río Negro, Argentina)	37
		Estudio satelital multitemporal de la alta cuenca del río Colorado para contribuir a la gestión sustentable del agua	43
		Primeros aportes en la predicción de propiedades edáficas usando imágenes satelitales	54
		Sistemas de Big Data reusables para el análisis de los recursos hídricos en los valles irrigados de la Norpatagonia	59
		Aplicación del modelo SWAT y técnicas de teledetección para evaluar inundaciones en cuencas pampeanas	61
		Calidad altimétrica de un modelo digital de elevación generado con imágenes banda L de SAOCOM	62
		Clasificación de cultivos utilizando el algoritmo Random Forest en Google Earth Engine sobre imágenes Landsat	63
		Modelación y geoinformación como herramientas de estudio de la dinámica del acuífero en valles irrigados de zonas áridas	64
		Modelización del consumo de agua de la caña de azúcar con diferentes regímenes de manejo agrícola	73
		Modelación del uso de la tierra e infraestructura en la cuenca alta de La Picasa (Córdoba)	75

INTRODUCCION

La gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) a escala de cuenca hidrográfica puede definirse como el conjunto de esfuerzos interinstitucionales e interdisciplinarios tendientes a la identificación y aplicación de herramientas técnicas, socioeconómicas y legales para el análisis y solución integral de los problemas derivados del uso de sus recursos naturales, con especial énfasis en el agua. Su objetivo central consiste en lograr un desarrollo de la sociedad, de su calidad de vida sin detrimento de recursos naturales y, por lo tanto, minimizando las externalidades negativas presentes y hacia las generaciones futuras. En este sentido, la GIRH en cuencas se constituye en un valioso instrumento del Estado y de la Sociedad para ordenar sus actividades, conciliar intereses, conservar los ecosistemas y sus servicios ecosistémicos a partir de un uso sostenible de sus recursos naturales. Entre los principales problemas comunes a casi todas las cuencas de la Argentina pueden mencionarse la ausencia de información de base e información actualizada sobre el estado de los recursos hídricos y sus cuencas, el incremento de las demandas de uso consuntivo y las alteraciones en ciclos hidrológicos regionales, así como también una progresiva disminución en la calidad y/o aptitudes para distintos usos. Estas alteraciones se explican por deficiencias en la gestión entre la oferta y la demanda del recurso que, a diferentes escalas, restringen el acceso, en cantidad y calidad, del agua atravesado por un contexto de efectos de variabilidad y cambio climático. La presión sobre los recursos hídricos pone de manifiesto las interdependencias hidrológicas, sociales, económicas y ecológicas que existen en las cuencas. Dichas interdependencias exigen enfoques y políticas integradas e intersectoriales para el desarrollo sostenible con énfasis en la gestión de los recursos agua y suelo.

En el marco de la GIRH, el INTA a través del proyecto estructural "Aportes para la gestión inte-

grada de los recursos hídricos en cuencas del Sistema Agroalimentario Argentino" ha visionado el manejo del territorio considerando la cuenca como unidad para la planificación y gestión participativa, incluyendo aspectos físico naturales, económicos, sociales y productivos en consistencia con los principios rectores de política hídrica de la Argentina. El enfoque integral y conocimiento sistémico de la cuenca permite proyectar el desarrollo regional y determinar el impacto ambiental de las actividades humanas y la variabilidad climática. El reconocimiento de la cuenca como la unidad de gestión por excelencia para la implementación de la GIRH constituye un aspecto insoslayable a la hora de enfrentar los problemas y desafíos pasados, presentes y futuros que conlleva la gestión sostenible del agua.

El objetivo de esta publicación es plasmar los resultados del proyecto y contribuir a la GIRH en cuencas del sistema agrobioalimentario y agroindustrial argentino mediante las acciones de investigación, extensión y articulación interinstitucional realizadas, centradas en: la hidrología-hidrogeología, la gobernanza y la formación de capacidades. La información científico-técnica aquí presentada responde a demandas territoriales o vacíos de conocimiento en el ámbito de la gestión integrada del agua, en diversas regiones del país, a través de un trabajo articulado interinstitucional en la mayoría de los casos. Esta memoria técnica está principalmente dirigida a técnicos, profesionales, administradores, funcionarios gubernamentales, alumnos y docentes de carrera de grado y posgrado y aporta información científico técnica actualizada y objetiva para la toma de decisiones relacionadas con la gestión del agua. Brinda una guía con avances y resultados de trabajos científico-técnicos y metodologías para la gestión integrada de recursos hídricos.

Los compiladores

CAPÍTULO 1

***GOBERNANZA
Y GESTIÓN
DEL AGUA***

Mesa del agua como herramienta para la gestión integrada del agua

Board table as a tool for integrated water management

Aumassanne Carolina¹; Fontanella Dardo¹; Durzo Juan Pablo²; Herrada Javier²

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional La Pampa San Luis, EEA Anguil, Agencia de Extensión Rural 25 de Mayo

² Cámara de Productores Agropecuarios Bajo Riego de 25 de Mayo, La Pampa

Resumen

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) se puede definir como un proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinados del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales. Bajo este paradigma, la oferta de agua dulce es limitada, vulnerable y compartida entre las diferentes demandas del territorio o cuenca y presenta una alta variabilidad espacial y temporal en su distribución. Desde hace 12 años la cuenca del río Colorado está atravesando un período seco, con caudales por debajo del promedio y restricciones en los usos del agua. En este contexto, en octubre de 2020 se creó en 25 de Mayo (La Pampa) la «Mesa de Diálogo para la Gestión de los Recursos Hídricos de la cuenca del río Colorado», una iniciativa impulsada por la Cámara de Productores Agropecuarios bajo riego. Los objetivos fueron: generar canales de comunicación horizontales, transparentes y permanentes entre todos los actores que tienen interés de uso o gestión del recurso hídrico, superficial y subterráneo, a fin de consensuar decisiones en un contexto de escasez del recurso, articular acciones y contar con un espacio de diálogo entre todos los actores e instituciones, usuarios y decisores, de la ribera pampeana del río Colorado. Este planteo tiene como base los desafíos en la gestión del agua en un contexto de escasez debido a una gran demanda que los diversos sectores productivos y las poblaciones tienen sobre el recurso junto a una oferta cada vez más limitada. La creación de la Mesa de Diálogo se concretó a través de una reunión virtual en la que estuvieron representados la Municipalidad de 25 de Mayo, el Ministerio de la

Producción, la Secretaría de Recursos Hídricos, la Secretaría de Energía y Minería, la Subsecretaría de Ambiente, el Ente Provincial del Río Colorado, la Cooperativa Colonizadora Argentina sede 25 de Mayo, el Comité Interjurisdiccional de la cuenca del río Colorado y la Agencia de Extensión del INTA 25 de Mayo (AER 25 de Mayo). La primera reunión se dividió en dos etapas: una primera etapa, los participantes hicieron una presentación sobre «el rol y responsabilidades» o interés, que cada uno tiene sobre la cuenca del río Colorado. Esto sirvió para hacer un mapeo de la demanda real del recurso hídrico y de las proyecciones de intervenciones en la calidad y cantidad para la gestión y uso del agua. Luego de unos meses se llevó a cabo un segundo encuentro con la participación de los mismos actores. Tanto autoridades como productores mostraron un marcado interés de mantener el espacio creado. En esta mesa los distintos actores expusieron las funciones, intereses e intervenciones sobre el río Colorado, además de los intereses y voluntades para intervenir en alguna medida en el territorio para transformar la realidad. Desde la AER 25 de Mayo se trabaja en diferentes líneas que tienen como tema transversal el agua, a escala de cuenca y lote por estar ubicados estratégicamente a la vera del río Colorado y comprometidos con el uso y la gestión eficiente del recurso. De esta manera, la creación de la mesa de intercambio permite hacer visible nuestro trabajo y aportar desde lo científico técnico con información actualizada relevada a campo y metodologías que contribuyen a la gestión integrada del agua.

Palabras clave

Riego, productores, río Colorado, escasez.

Informe hidrometeorológico de la cuenca del río Colorado: un instrumento para la toma de decisión

Hydrometeorological report of the Colorado River basin: an instrument for decision making

Aumassanne, Carolina¹; Oricchio, Patricio²; Beget, Maria Eugenia²; Gattinoni, Natalia Noemí²; Masseroni, Maria Lujan¹; Fontanella, Dardo Roy¹; Varela, Ayelén Celeste¹; Ramis, Vanesa²; Espindola, Aime²; Dunel Guerra, Luciana Gisele³; Vanzolini, Juan Ignacio³; Storniolo, Romina³

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional La Pampa-San Luis, EEA Anguil, Agencia de Extensión Rural 25 de Mayo

2 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Clima y Agua

3 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Buenos Aires Sur, EEA Hilario Ascasubi

Resumen

En cuencas de régimen nival como la cuenca del río Colorado, las variaciones espaciales y temporales de la cubierta de nieve, determinan la disponibilidad de agua, dado que la superficie cubierta de nieve es un claro indicador de la cantidad de recursos hídricos almacenados. Actualmente, existe la posibilidad de contar con información derivada de sensores remotos para cuantificar la cobertura de nieve y conocer con algunos meses de anticipación el volumen de agua que estaría disponible para los diversos usos (urbano, agrícola, minero, entre otros). Además, existen otras fuentes de información que permiten estimar componentes del balance de agua, resultando en una interesante fuente de información complementaria de estaciones nivométricas e hidrológicas. En este contexto, este trabajo tiene como objetivo presentar el informe hidrometeorológico que publica el INTA periódicamente, su alcance y la metodología empleada. Este instrumento contiene información actualizada de la superficie cubierta de nieve, el caudal del río, y su calidad de agua, la relación de estas variables con los promedios históricos, y a su vez, presenta pronósticos meteorológicos a corto, mediano y largo plazo. De esta manera, provee información de base esencial para la toma de decisiones relacionadas a la planificación y el manejo integral del recurso hídrico en la cuenca del río Colorado. Este trabajo tiene distintas escalas de abordaje, la primera corresponde a la cuantificación del área cubierta por nieve en las subcuencas del Grande y del Barrancas, que se corresponden con la cuenca activa del río Colorado; y del caudal en la estación Buta Ranquil, primera estación de

aforo del río Colorado y en la estación Paso Alsina, en el ingreso al área bajo riego del Valle Bonaerense del Río Colorado. Por otro lado, se analiza la calidad del agua en dos estaciones, Punto Unido (La Pampa) y Paso Alsina. Y, por último, toda la cuenca del río Colorado para el análisis y presentación de pronósticos meteorológicos. El informe se elabora desde INTA Agencia de Extensión Rural (AER) 25 de Mayo (La Pampa) en colaboración con el Instituto de Clima y Agua del Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIRN) y la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) de Hilario Ascasubi. Este informe es publicado cada dos meses desde el año 2020 y contiene información de: cobertura de nieve estimada a partir del producto MOD10A2 en la cuenca alta del río Colorado; caudal del río Colorado en la estación Buta Ranquil (Neuquén); calidad de agua del río Colorado en 25 de Mayo y estación de aforo Paso Alsina a partir de determinaciones realizadas en laboratorios de INTA (AER 25 de Mayo y EEA Hilario Ascasubi) y pronósticos de temperatura y precipitación a corto y mediano plazo para toda la cuenca del río Colorado. El informe es enviado por correo electrónico y vía mensajería instantánea (WhatsApp) a todos los actores de la cuenca interesados (productores, tomadores de decisión, técnicos), y luego es subido al repositorio digital institucional en el cual queda disponible para ser consultado y descargado (<https://inta.gob.ar/documentos/informe-hidrometeorologico-de-la-cuenca-del-rio-colorado>).

Palabras clave

Cuenca, agua, caudal, pronósticos, nieve.

La articulación interinstitucional y la gestión integrada de cuencas: estudio de caso en el Río Colorado, Argentina

Inter-institutional articulation and integrated watershed management: a case study in the Colorado river, Argentina

Aumassanne Carolina¹; Solorza Romina²; Salcedo Ana Paula³; Teverovsky Sofia²; Soldano Alvaro²; Machado Federico²; Bonilla Jorge³; Fontanella Dardo¹

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional La Pampa San Luis, EEA Anguil, Agencia de Extensión Rural 25 de Mayo

2 Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Gerencia de Observación de la Tierra. Centro Espacial Teófilo Tabanera

3 Instituto Nacional del Agua (INA). Subgerencia Centro Regional Andino

Resumen

Se entiende a la gestión integrada de recursos hídricos como el conjunto de esfuerzos interinstitucional e interdisciplinarios tendientes a la identificación y aplicación de herramientas técnicas, socioeconómicas y legales para la solución integral de los problemas derivados del uso de sus recursos naturales. La cuenca del río Colorado, inmersa en un sistema árido, experimenta una situación hidrometeorológica crítica en los últimos 12 años producto de la variabilidad natural propia del sistema y del cambio climático global, atravesando el período seco más extenso que se ha registrado en las bases de datos hidrométricas disponibles. El río Colorado presenta una marcada estacionalidad primavera-verano, atribuida a su régimen nival. La importancia del río Colorado en la región, radica en que es la principal, y en muchos casos única fuente de abastecimiento de agua para diversos usos: consumo humano, riego, minería, entre otros, en toda la diagonal árida de las cinco provincias que recorre y de otras poblaciones extra-cuenca. Por lo tanto, estudiar la nieve, como variable hidrológica principal de la cuenca, es de interés regional y nacional para el manejo sustentable de este importante recurso hídrico de los Andes semiáridos de la República Argentina. En este contexto, a partir de la disponibilidad de herramientas y datos, resulta factible un abordaje a distintas escalas temporales (anual e interanual) para el estudio de la cantidad de nieve acumulada durante cada invierno y su varia-

ción espacio temporal, parámetros que determinan en definitiva la oferta hídrica de la cuenca. De esta manera, surge la necesidad de contar con información y herramientas que nos permitan monitorear la cuenca alta del río Colorado, entendiendo que la información generada resulta clave para la gestión y aprovechamiento sostenible del recurso, y para minimizar los impactos y riesgos en la gestión integrada del agua. El objetivo de esta presentación es plasmar el trabajo articulado que se viene realizando en la cuenca alta del río Colorado en el marco de convenios de cooperación técnica entre tres instituciones nacionales de ciencia y técnica, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), el Instituto Nacional del Agua (INA) y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). El objetivo general de los convenios es avanzar en la investigación de variables hidrometeorológicas con impacto en los procesos productivos en el sector de la cuenca alta del río Colorado. Concretamente, se está trabajando en los objetivos particulares: a) Construir información topográfica de alta resolución para la alta cuenca del río Colorado y analizar su morfometría, entendiendo que el funcionamiento de una cuenca depende de sus características físicas, a) definir y calibrar metodologías en un sitios pilotos, b) Generar series multianuales de la cobertura de nieve explotando el uso de diversos sensores ópticos y radar, a fin de analizar espacial y temporalmente la distribución del manto nival, c)

Identificar alcances y limitaciones de técnicas interferométricas con datos SAR para la estimación del equivalente de agua en nieve, d) analizar las variaciones de temperatura de superficie y su relación con la fusión de la nieve, e) investigar proyecciones de escenarios de cambio climático y su incidencia sobre la temperatura y precipitación, f) la modelación hidrológica para la predicción de caudal en la cuenca alta del río Colorado, y por último, g) analizar la relación oferta-demanda del agua considerando la disponibilidad del recurso en la alta cuenca, que depende de la precipitación hidro-nival, y la demanda por parte de los usuarios del agua en la cuenca baja para los distintos usos. Por otra parte, dentro de las actividades realizadas se lleva a cabo la formación de los equipos técnicos de cada institución y de esta forma contribuir a las capacidades en relación a la gestión integrada de los recursos hídricos.

Palabras clave

Cuenca, nieve, modelos, teledetección.

Red público-privada de monitoreo de agua subterránea en el Valle Central Antinaco-Los Colorados

Public-Private groundwater monitoring network in the Antinaco-Los Colorados Central Valley

Miguel, Roberto Esteban¹; González Ribot¹; Joaquín Víctor¹

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Catamarca La Rioja, EEA Chilecito

Resumen

El valle central Antinaco-Los Colorados es el área agro productiva y agroindustrial más importante de la provincia de La Rioja con aproximadamente 21.650 ha de olivo, vid, nogal, hortalizas y otras producciones menores. Alrededor del 90 % de esta superficie se riega exclusivamente con agua subterránea. En el año 2006, se efectuó el último documento integral sobre la evolución hidrogeológica del recurso hídrico que estuvo a cargo del Instituto Nacional del Agua. En el año 2014, debido a la demanda de productores tradicionales, intensivos y superintensivos, es que desde el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria se decide construir una red de monitoreo de agua subterránea que incluyó la medición de pozos de instituciones públicas y mayormente de privados vinculados a la producción agrícola en el valle. Este trabajo describe el proceso de construcción de la red, los desafíos y obstáculos resueltos y por resolver, así como exponer sucintamente los resultados. El principal desafío de la red fue construir la confianza, aspecto clave, ya que la medición de un pozo representa el punto crítico de toda producción dependiente de agua subterránea. Esta confianza se inició a partir de exponer el qué, el para qué y el porqué de las mediciones. Algunos productores accedieron rápidamente, otros se mostraron renuentes –por ser visitados por otras instituciones que no devolvieron información– y otros se negaron. Sin embargo, la primera medición no quedó “sólo en eso”, ya que cada productor e institución previo a la futura medición recibió un informe sobre los parámetros de funcionamiento de su pozo, así como de la calidad química de las aguas explotadas. Esta acción de colaboración mutua generó la confianza, y algunos reticentes se sumaron a la

red que en el año 2023 ya cuenta con más de 100 pozos. Además, esta confianza ha permitido la firma y desarrollo de cinco convenios de colaboración técnica que financian parcialmente la red. No obstante, existen aún algunos obstáculos que limitan la ampliación de la red y por lo tanto de la información generada: numerosos pozos carecen de caños piezómetros –para medir los niveles de agua–, algunos presentan caños piezómetros mal colocados –que ponen en riesgo las sondas– y otros carecen de caudalímetros funcionales y manómetros de presión en condiciones. Los resultados permiten al productor o institución conocer el estado de situación puntual de su pozo (nivel estático y dinámico, caudal específico y calidad química de las aguas explotadas) mientras que la integración de los datos individuales posibilitó conocer la piezometría, las direcciones de flujo de agua subterránea, las pérdidas de reservas y la evolución hidroquímica del sistema. Los resultados evidencian que, en el área bajo cultivos, el acuífero del valle central se encuentra bajo un proceso de explotación intensiva, con descenso de niveles piezométricos con tasas que varían entre 0,5 y 1,5 m.año⁻¹ y pérdidas de reservas de agua subterránea en todas las áreas, mientras que en algunos sectores se han advertido procesos de contaminación por retornos de riego y efluentes. La red cuenta con nueve años de datos de piezométricos ininterrumpidos tomados en los meses de menor (junio-julio) y mayor demanda hídrica (diciembre-enero) lo que la constituye en una de las áreas con mayores datos relevados de manera no automática en escala temporal y espacial del país.

Palabras clave

Red de monitoreo, hidrogeología, riego.

Tensiones y desafíos para la gestión del agua en el Valle Inferior del Río Chubut

Tensions and challenges for water management in the Lower Valley of the Chubut River

Salvadores, Franco¹; Diaz, Lucas¹; Hernández, Marcos¹

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Patagonia Sur, EEA Chubut

Resumen

En el marco del Proyecto Estructural del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA): Aportes para la gestión integrada de los recursos hídricos en cuencas del sistema agroalimentario argentino, la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Chubut realizó diferentes actividades y experiencias de investigación, extensión y comunicación en la cuenca inferior del río Chubut. Éstas permitieron poner en perspectiva, formular un diagnóstico y delinear estrategias de acción en el territorio del Valle Inferior del Río Chubut para proveer a la seguridad hídrica local y regional desde un abordaje multiescalar. En este sentido, una de las actividades organizadas consistió en una serie de seminarios web con el Centro de Investigación Interdisciplinaria sobre Dinámica de Sistemas de Agua de la UNESCO¹ que permitió intercambiar dialógicamente con otras experiencias en el mundo de gestión del agua en cuencas confrontadas a escasez y subrayar la importancia de la complementariedad en la búsqueda de soluciones adaptativas frente al cambio climático. A escala de la cuenca, los proyectos desarrollados en colaboración con las instituciones que conforman el Grupo Técnico del Río Chubut (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Centro Nacional Patagónica, Universidad Nacional

de la Patagonia San Juan Bosco; Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Chubut; Universidad de Chubut) enfatizaron en el desafío de superar la fragmentación institucional, en términos de gobernanza del agua², en un contexto de aumento de eventos críticos³ y remarcar la necesidad del fortalecimiento de los espacios de representación y de la participación de otras identidades como mujeres, jóvenes y pueblos originarios⁴. A escala del sistema de riego, se desarrolló un trabajo de caracterización del valle irrigado⁵ a partir de encuestas a usuarios que dio lugar a publicaciones que enfatizaron sobre la importancia de la gestión comunitaria del agua en los canales de riego y las posibles estrategias para hacer frente a la escasez hídrica⁶. A escala predial, se trabajó en el análisis de las relaciones hidro-físicas de la textura de suelo⁷ y la determinación de su cobertura como insumos para la gestión del agua en las chacras que constituyen el valle irrigado y la toma de decisiones relativas al momento y a la eficiencia del riego.

Las diversas experiencias de indagación teórica, trabajo de campo y abordaje multidisciplinar facilitadas por el Proyecto Estructural permitieron identificar una problemática subyacente para la gestión del agua en el Valle Inferior del Río Chubut relativa a la capacidad de los diversos

1 UNESCO ICIReWaRD, <https://en.unesco-montpellier.org/>.

2 Proyecto Governagua, <https://governagua.org/>.

3 Emergencia Hídrica 2021-2022: Situación socio-ambiental de las cuencas de los ríos Chubut y Senguer, <https://www.repositorio.cenpat-conicet.gob.ar/handle/123456789/1485>.

4 Proyecto Un río todas las aguas, <https://unriotodaslasaguas.com.ar/>

5 Caracterización del sistema de riego del Valle Inferior del Río Chubut, <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/8959>.

6 La escasez de agua en el Valle inferior del Río Chubut, reflexiones desde quienes riegan, https://sipas.inta.gob.ar/sites/default/files/archivos/36_6%20Raguileo.

7 Textura por el método de la pipeta: nuevo análisis en el Laboratorio de Suelos en INTA Chubut, https://sipas.inta.gob.ar/sites/default/files/archivos/Nueva_tecnica_LANAG.pdf.

actores territoriales para implementar estrategias compartidas que permitan la preservación del recurso, la igualdad en el acceso y el rendimiento de la actividad agropecuaria en un marco de debilidad y fragmentación institucional en un marcado contexto de variabilidad y cambio climáticos⁸.

La identificación de tensiones entre actores y entre sectores económicos hace necesario el establecimiento de objetivos en lo relativo a la generación y sociabilización de información, la adaptación en el uso de tecnologías, el fortalecimiento de la gobernanza y de la comunicación a públicos heterogéneos. Estos objetivos son reflejados en la nueva cartera programática regional para Patagonia que busca promover y fortalecer las tecnologías de manejo, uso y acceso equitativo del agua en los sistemas productivos agrobiindustriales, propiciando procesos de planificación a distintas escalas.

Las experiencias emprendidas en el marco del Proyecto Estructural emplearon metodologías de carácter cuantitativo, cualitativo y mixto utilizando diversas técnicas en las que se destacó la importancia de un abordaje transdisciplinar de los problemas del agua en la cuenca inferior del río Chubut. Los resultados en las distintas experiencias sirvieron para la formulación y ejecución de otros proyectos de menor envergadura, pero con mayor impacto territorial, que en función de los aprendizajes del Proyecto Estructural profundizaron en aspectos como la gestión del agua en los canales comuneros y el fortalecimiento de la gobernanza del agua como un bien común.

Palabras clave

Agua, gobernanza, Patagonia, riego, comunidad.

⁸ Caracterización y análisis multidimensional en torno a la gobernanza del agua en el Valle Inferior del Río Chubut <http://www.revistas.unp.edu.ar/index.php/parrafosgeograficos/article/view/876>

Construcción colectiva de conocimiento para la protección de manantiales en Vichigasta, La Rioja

Collective construction of knowledge for the protection of springs in Vichigasta, La Rioja

Silva, Santiago Hernán¹; Rodríguez, Corina Iris¹; Miguel, Roberto Esteban²

1 Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Humanas, Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales. Becario CONICET

2 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Catamarca La Rioja, EEA Chilecito

Resumen

La cuenca Antinaco-Los Colorados se emplaza en el centro de la provincia de La Rioja y se caracteriza por un marcado y continuo estrés hídrico. Sin embargo, su geología permite el almacenamiento de importantes volúmenes de agua subterránea. Hacia su centro-oeste, en la localidad de Vichigasta, las características geológicas provocan en el área de escarpa de falla que el recurso hídrico subterráneo se manifieste en manantiales enterrados. Este recurso es la principal fuente de agua que sustenta la agricultura familiar y la actividad de pequeños productores, quienes expresan preocupación por las mermas en los caudales y la calidad del agua de los manantiales debido principalmente a la construcción y funcionamiento de pozos de bombeos aguas arriba de la escarpa de falla. En tal sentido, el objetivo de este trabajo es analizar y describir la importancia de la participación colectiva en la construcción de conocimiento sobre la situación ambiental de los manantiales para la conservación del recurso hídrico y su gestión integral. A partir de las visitas a predios productivos, manantiales privados, encuestas, entrevistas y reuniones con actores de gestión y una jornada escolar se obtuvo información cuali-cuantitativa sobre las particularidades de los productores, modos de uso, apropiación y la red de actores vinculados en la gobernanza del recurso hídrico. A su vez, mediante la participación activa de los productores se recopilieron datos antecedentes y se efectuaron relevamientos y muestreos de campo que permitieron establecer las características físico-químicas de los manantiales. Los resultados indicaron una merma general de caudales e inclusive el agotamiento del 50% de los manantiales

que se asocia a limitaciones y condicionantes que afectan la gestión del recurso y la actividad económica de los pequeños productores familiares. A su vez, las concentraciones de flúor (promedio de 2,4 mg. l⁻¹) detectadas en el agua de manantiales no son aptas para consumo humano según el Código Alimentario Argentino. Por otra parte, hacia el suroeste del área el recurso hídrico subterráneo evolucionó con un incremento sostenido de salinidad –de 500 a 2.300 $\mu\text{S cm}^{-1}$ en seis años– con un probable origen en impactos por retornos de riego y la extracción de agua mediante pozos de bombeo aguas arriba de estos manantiales. Se concluye que a partir de la preocupación y la participación activa de los productores y de la población en general se logró analizar y comprender conjuntamente la problemática ambiental en torno al recurso más importante para el área y desarrollar conocimientos académicos y extra-académicos. De esta manera desde la población del distrito Vichigasta, en conjunto con distintas instituciones y organismos, se solicitó a las autoridades de aplicación medidas de protección y la reglamentación de la Reserva de Usos Múltiples de Vichigasta, a fin de conservar y proteger los manantiales en un marco de gestión participativa del recurso hídrico.

Palabras clave

Manantiales, Gestión Integral del Recurso Hídrico, gobernanza, agricultura familiar.

Prospectiva de la Cuenca del Río Tunuyán Superior: escenarios y hoja de ruta al 2030

Foresight of the Tunuyan Superior river: scenarios and road map to 2030

Vitale Gutierrez, Javier Alejandro¹; Ortega, Laura²; Levatino, Belén²; Lavanderos Becerra, Débora María³; Pizzolato, Roberto Daniel³

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Mendoza San Juan

2 Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, Centro de Estudios e Investigación de Políticas Ambientales y Cambio Climático "Edgardo Díaz Araujo"

3 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Mendoza San Juan, EEA La Consulta

Resumen

Los impactos del cambio ambiental global y gestiones poco efectivas afectan el futuro de la seguridad hídrica de las cuencas colocándolas en alto riesgo. En este contexto, surge el Proyecto "Prospectiva hídrica de la cuenca del Tunuyán Superior al año 2030", enmarcado en un convenio interinstitucional entre el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), las Facultades de Ciencias Económicas, y Ciencias Políticas y Sociales de la Universidad Nacional de Cuyo, el Instituto Nacional del Agua y el Departamento General de Irrigación. Además, de la colaboración en los talleres de la empresa "Eco De Los Andes".

La finalidad del trabajo fue construir escenarios hídricos de la Cuenca al año 2030, identificar oportunidades y amenazas emergentes, y brindar conocimientos sobre el futuro del recurso hídrico, y otorgar recomendaciones para la definición de políticas, estrategias y prioridades.

El arco temporal abarcó de mayo de 2018 a diciembre de 2019, realizándose cuatro talleres participativos. El trabajo inició con la confección del diagnóstico prospectivo, que permitió integrar y sintetizar las principales problemáticas y potencialidades, estructurado en las siguientes dimensiones de análisis: social-cultural, tecnológica, física-ambiental, económica-productiva, y política-institucional. El diagnóstico permitió identificar los procesos de transformación a lo largo del tiempo, y priorizar las problemáticas y potencialidades actuales y emergentes de la cuenca.

La importancia de las dinámicas hídricas fue explorada con la matriz de importancia e incertidumbre, y concluyó en las tendencias e incertidumbres futuras que influyen en la configuración

de los escenarios posibles al 2030. Las tendencias encontradas fueron: la conflictividad social y política; los problemas de acceso a la tierra; el mayor riesgo aluvional aguas debajo, y en áreas deprimidas; la fragilidad ambiental del territorio y la disminución en el volumen del agua subterránea. Respecto de las incertidumbres figuran: la inversión en alta tecnología; la demanda de mano de obra especializada; la calidad de agua, superficial y subterránea; y la eficiencia en el manejo del agua de riego.

El diseño prospectivo continuó con la construcción de escenarios posibles a través del análisis morfológico. En el taller de escenarios se construyó socialmente una visión de futuro tendencial y dos alternativas (pesimista y deseada). Finalmente, sobre la imagen deseada se derivaron los ejes y acciones estratégicas que constituyeron la hoja de ruta para la gestión integrada del recurso hídrico como resultado principal del desarrollo del estudio.

La visión estratégica de la cuenca se caracteriza por el mantenimiento de la inversión en alta tecnología para la producción agrícola, promovida por políticas públicas; la disponibilidad de agua de calidad, superficial y subterránea, debido al tratamiento integral de los vertidos de origen industrial, agrícola y humano (sólidos y líquidos); el aumento de la eficiencia en el manejo del agua de riego, superficial y presurizado (intra - extra predial), promovida por una política de Estado que generará incentivos; el incremento de la demanda de mano de obra especializada de forma estacional, mientras que continúa disminuyendo la contratación de personal permanente, y proliferando la presencia de trabajadores transito-

rios y tercerizados. La visión proporcionó los ejes estratégicos prioritarios para la acción política y gestión hídrica del área de estudio, a saber: tecnología; agua; ordenamiento territorial y empleo.

Finalmente, el estudio facilitó la identificación y priorización de acciones sistemáticas y multidimensionales, contempladas en el mapa estratégico y hoja de ruta para abordar las complejidades y transformaciones hídricas, actuales y emergentes.

El proceso participativo y de construcción colectiva de acuerdos de mediano plazo fue altamente relevante debido a la contribución de más de 120 actores de la cuenca, el trabajo basado en evidencia disponible y consolidada en el diagnóstico prospectivo a partir de la expertise de los referentes de la cuenca, la interacción en los talleres y las conversaciones estratégicas mantenidas en las mesas de trabajo.

Palabras clave

Investigación participativa, problemas hídricos, construcción social, planificación estratégica.

CAPÍTULO 2

***HIDROLOGÍA
SUPERFICIAL Y
SUBTERRÁNEA***

Cambios en propiedades físicas del suelo de estepas en pastoreo que afectan su comportamiento hidrológico

Changes in physical soil properties of pastoral steppes affect the soil hydrological response

Aramayo, Valeria¹; García Falabella, Brenda^{1 2 3}; Cremona, María Victoria^{1 2 3}; Nosetto, Marcelo^{3 4}

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro Regional Patagonia Norte, EEA Bariloche

2 Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias Bariloche (IFAB)

3 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

4 Universidad Nacional de San Luis, Instituto de Matemática Aplicada San Luis (IMASL) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Resumen

La modelación hidrológica en paisajes de zonas áridas es compleja dada la heterogeneidad espacial de las propiedades físicas y la infinidad de interacciones existentes entre el suelo, la vegetación, los factores climáticos y el manejo. Los pastizales naturales y el pastoreo extensivo, como forma de uso de la tierra, abarcan la mayoría de la superficie de la Patagonia, sin embargo, existen vastos interrogantes sobre las características del suelo que condicionan los flujos del ciclo hidrológico en esos ambientes. Para entender mejor la respuesta hidrológica de los paisajes patagónicos en pastoreo estudiamos las propiedades físicas de una ladera de estepa arbustivo-graminosa en dos estados distintos por diferente pastoreo histórico en la salida del invierno, con elevada humedad antecedente. Se evaluaron: la resistencia a la penetración $-kg.(cm^2)^{-1}$ con penetrómetro manual, la densidad aparente $-gr.(cm^3)^{-1}$ con el método del cilindro y el índice de infiltración $(mm.min^{-1})$ con un infiltrómetro de anillo simple, en dos posiciones de la ladera conectadas hidrológicamente (ladera alta LA – ladera baja LB) para los estados III y IV (este último más alterado por pastoreo). Los análisis estadísticos se realizaron en R empleando el test de Kruskal-Wallis. Los resultados indican que las tres variables físicas difieren entre estados de la vegetación. La posición en el paisaje mostró diferencias para la resistencia $(1,1 \pm 0,8$ vs $0,8 \pm 0,6$ $kg.(cm^2)^{-1}$, en LA y LB respectivamente). Hubo interacción entre estado y posición para la resistencia, la densidad aparente y el índice

de infiltración que distinguen al estado IV en posición alta del resto. La combinación de los factores evaluados indicaría que es este último estado es el elemento del paisaje con menor capacidad de capturar el agua de las precipitaciones dado que presenta la mayor resistencia a la penetración $(1,2 \pm 0,2$ $kg.(cm^2)^{-1}$) y el menor índice de infiltración $(2,2 \pm 1,9$ $mm.min^{-1})$. Las diferencias en las propiedades físicas del suelo evaluadas para los distintos estados producto del pastoreo histórico pueden tener efecto en el comportamiento hidrológico con diferente respuesta ante las precipitaciones. Las alteraciones sobre los flujos del ciclo hidrológico en los pastizales naturales afectan el uso eficiente del agua.

Palabras clave

Patagonia, estado de la vegetación, agua del suelo.

Análisis temporal de las sequías en la provincia de Santa Cruz

Temporal analysis of droughts in the province of Santa Cruz

Almonacid, Leandro¹; Pessacg, Natalia^{2 3}; Diaz Boris^{3 5}; Peri, Pablo^{3 4 5}

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Patagonia Sur, Convenio Municipalidad de Río Gallegos

2 Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales

3 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Centro Nacional Patagónico

4 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - Centro Regional Patagonia Sur, EEA Santa Cruz

5 Universidad Nacional de la Patagonia Austral

Resumen

Las sequías son un fenómeno natural que afecta a múltiples actividades humanas, desde la agricultura a la salud pública, y amenaza a la sostenibilidad de los sistemas ambientales. La provincia de Santa Cruz ha experimentado recientemente diversos eventos de sequía, con impactos variables en términos de extensión territorial, así como de severidad y duración. A partir de la base de datos de precipitación CRU TS v.4.06 y la utilización del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), se evaluó la ocurrencia de éstos eventos (EV) en dos periodos, un pasado lejano (1961 – 1990) y un pasado reciente hasta el presente (1991 – 2020). Se calculó la frecuencia de eventos totales ($SPI < 1$), eventos extremos ($SPI < 2$), duración media y severidad media para cada período.

Los resultados preliminares evidencian una gran variabilidad espacial y temporal de los EV, en frecuencia, severidad y duración. Se presentan dos grandes gradientes de comportamiento, uno en la región oeste – noreste de la provincia, con mayor ocurrencia de sequías en el pasado reciente, en un promedio de hasta 1,7 EV/década, en oposición al sector sur y noroeste, donde en relación al pasado lejano, la ocurrencia resultó menor, del orden de 0,5 EV/década menos. Sin embargo, en esta última, la mayoría de éstos resultaron de severidad extrema. Para la mayor parte del territorio, la duración media resultó ser menor en las décadas más recientes (1-1,5 meses/EV). El centro y noreste, a pesar de presentar la mayor frecuencia de EV para el periodo actual, en relación al pasado, presentó la menor severidad media de éstos ($\Sigma SPI_{1991-2020} = -4$ a -5 ; $\Sigma SPI_{1961-1990} = -5$ a $-6,5$). Este trabajo muestra la importancia del

monitoreo de estos eventos, que se manifiestan de forma variable a lo largo de los últimos años, y comienzan a ser importantes, en términos del impacto económico, para los productores ganaderos de la región.

Palabras clave

Clima, precipitaciones, cambio climático.

Estudio y caracterización de sedimentos del agua del río Colorado, Argentina

Study and characterization of sediments in the water of the Colorado river

Aumassanne Carolina¹; Masseroni María Lujan¹; Fontanella Dardo¹; Varela Ayelen¹; Bartel Andrea²

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional La Pampa-San Luis, EEA Anguil- AER 25 de Mayo

2 Universidad Nacional de La Pampa, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Geología

Resumen

El río Colorado se origina en la confluencia de los principales afluentes, los ríos Grande y Barrancas, y fluye alrededor de 1.200 km atravesando parte de las provincias de Mendoza, Neuquén, Río Negro, La Pampa y Buenos Aires. Presenta una marcada estacionalidad primavero-estival, atribuida a su régimen nival. El río Colorado adquiere la tonalidad que le da nombre, a partir de los sedimentos que provienen de secuencias clásticas (areniscas, pelitas y conglomerados). Estas unidades sedimentarias están intensamente afectadas por el proceso de erosión fluvial, por cursos estacionales, tributarios locales del río, al cual llegan en general mediante extensos conos aluviales. Esta condición se mantiene hasta el embalse de Casa de Piedra, donde la carga clástica transportada se deposita. Aguas arriba del embalse Casa de Piedra se presenta el mayor cambio de uso y cobertura del suelo, debido a la actividad hidrocarburífera, dejando el suelo desnudo, y la vegetación fragmentada a nivel de paisaje. Estas intervenciones humanas, con alta frecuencia e intensidad, implican una nueva impronta de la biota sobre la dinámica hidrológica. Desde la perspectiva humana, los servicios hídricos involucran no sólo la provisión de agua (consumo humano, riego, industria) sino también la regulación de los flujos de agua como fuerzas destructoras y/o contaminantes (sedimentación de cursos). Al menos estas dos facetas "utilitarias" del ciclo hidrológico deben ser consideradas al explorar los posibles usos de la tierra. Luego de detectar y analizar los principales cambios en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca media del río Colorado realizado mediante el análisis temporal de imágenes sateli-

tales se observó el avance de la actividad en la cuenca. Para esta zona otros estudios han identificado áreas susceptibles a procesos de remoción en masa y erosión fluvial. Su ocurrencia depende de factores naturales internos (grado de cohesión de materiales) y externos (pendiente). La expansión de la actividad petrolera, favorece el escurrimiento y movimiento de sedimentos, generando externalidades, por ejemplo, sobre los sistemas de riego, mediante el elevado transporte de material sólido del río, causando continuo e importante ingreso de sedimentos en las obras de captación y transporte. Ante esta situación, se plantea analizar la variación temporal de los sedimentos del río Colorado y su fuente de generación. Para ello se obtuvieron tres conos de sedimentación Imhoff para determinar la cantidad de sólidos sedimentables y velocidad de sedimentación, a partir de diferentes lecturas de sedimentación al cabo de 2 minutos, 10 minutos, 2 horas y 24 horas. Se realiza para muestra por triplicado y luego se calcula un promedio de la velocidad de sedimentación y la carga total de sólidos sedimentables en la muestra. Las determinaciones se realizan desde mayo de 2021, como un trabajo de rutina de la Agencia de Extensión Rural del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria 25 de Mayo, junto con las determinaciones de pH, conductividad eléctrica y total de sólidos disueltos. También se está avanzando en un trabajo interinstitucional con la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de La Pampa para la caracterización de los sedimentos presentes en el agua: tamaño, composición, forma. Las líneas de investigación aquí presentadas constituyen un punto de partida de futuras investigaciones, en el

cual se aborda un problema local y una demanda territorial de manera integral, con vistas a un manejo y gestión integral del recurso hídrico.

Palabras clave

Cobertura de suelo, calidad de agua, sedimentación.

Comportamiento en el largo plazo de la erosividad de las lluvias en Buenos Aires (norte)

Behavior in the long term of the erosivity of the rains in Buenos Aires (north)

Castiglioni, Mario G.¹; Havrylenko, Sofia²; Espindola, Aime²; Gusmerotti, Lucas²

1 Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos

2 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Clima y Agua

Resumen

La erosión hídrica es un proceso que se caracteriza por la desagregación de las partículas del suelo producto del impacto de la gota de lluvia, su transporte por salpicado o escurrimiento del agua y, por último, su depósito en sectores más bajos. La característica de la lluvia que impacta en el suelo representa un factor decisivo en el proceso de erosión hídrica, el cual ha generado problemas productivos y ambientales en la provincia de Buenos Aires (Argentina). En el área de estudio, localizada en Pergamino (Bs As), norte de la región Pampeana, se observan estas dos características: suelos susceptibles al proceso de erosión hídrica y lluvias anuales que rondan los 1000 mm, donde el período de mayor intensidad ocurre durante la primavera-verano-otoño. En las últimas décadas, se ha observado un aumento en la frecuencia de tormentas severas e intensas, lo que a priori podría indicar un incremento del daño por erosión. No obstante, dependiendo de la metodología utilizada y del período de tiempo analizado, se han mostrado resultados contradictorios en cuanto a la erosividad de las lluvias. El área de estudio presenta un paisaje de relieve ondulado con gradientes en las pendientes que pueden llegar al 4 % y largos de 1.000 m. Predominan los suelos del tipo Argiudol que tienen en profundidad un horizonte textural de baja permeabilidad. Estos suelos son los más productivos de la región Pampeana, pero su capacidad de generar buenas cosechas ha ido disminuyendo debido al aumento en la intensidad de los procesos erosivos, como es el caso de la erosión hídrica. El objetivo del trabajo fue analizar el comportamiento en el largo plazo de la erosividad de las lluvias para el área de Pergamino. La erosividad de las lluvias es un pará-

metro climático que se utiliza en muchos modelos de erosión. Este parámetro necesita como input la intensidad de lluvia, información que no siempre está disponible. Por consiguiente, se han desarrollado diversas funciones de predicción a partir del índice de Fournier modificado. Se trabajó con información pluviométrica (1934-2019) de la Estación Experimental Agropecuaria Pergamino (Buenos Aires) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Inicialmente, se calculó el Índice de Fournier Modificado (IFM) y luego se transformó a valores de erosividad de lluvia (R) a través de la ecuación de Kraemer et al. (2018). Se determinaron las medias móviles de R de 20 y 30 años, y la relación entre R y los eventos El Niño - Oscilación del Sur (ENOS). Se observó un incremento en la media móvil de 20 años de R desde 1970 hasta 2003 y luego una estabilización con un 3 % de variación hasta el 2019. El aumento de la media móvil de 30 años de R comprendió el periodo 1983 - 2002, y luego su valor tuvo una variación del 2 % hasta 2019. Este comportamiento representó un incremento en el riesgo de erosión hídrica para esta región del 60 %. Las oscilaciones anuales del R estimado entre 1970 y 2019 no presentaron una relación significativa con el Índice ONI (Oceanic Niño Index).

Palabras clave

Erosión hídrica, Índice de Fournier Modificado, riesgo, ONI.

Respuesta hidrológica en una microcuenca agrícola frente a dos escenarios de humedad de suelo contrastantes

Hydrological response in an agricultural micro-basin in front of two scenarios of contrasting soil moisture

Castiglioni Mario G.¹; Espindola Aime²; Havrylenko Sofia²; Gusmerotti Lucas²; Lisa Juan³

1 Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos

2 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Clima y Agua

3 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Buenos Aires Norte, EEA Pergamino, AER Rojas

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue evaluar, en dos períodos del año con condiciones de humedad de suelo contrastantes, la respuesta en el escurrimiento y en el contenido hídrico edáfico respecto a diferentes tormentas ocurridas en una microcuenca agrícola de la Pampa Ondulada. El área tiene una superficie de 1.495 ha y está localizada en el partido de Rojas (provincia de Buenos Aires), y donde predominan los cultivos de verano bajo siembra directa. Se obtuvo información de escurrimiento, lluvia y humedad de suelo a partir de diferentes sensores, comparando los resultados en dos períodos del año: septiembre-noviembre de 2019 (P1) y diciembre de 2019 - febrero de 2020 (P2). Durante P2 se observó un contenido hídrico promedio del suelo previo a las lluvias del 12 %, 12 % y 20 %, respectivamente, para las profundidades de 5 cm, 15 cm y 25 cm, valores que resultaron significativamente menores al promedio registrado en P1 para los mismos estratos de suelo (35 %, 37 % y 43 %). La precipitación acumulada para P1 fue 202 mm y 347 mm para P2. Sin embargo, el aumento en la humedad edáfica de cada estrato de suelo como consecuencia de las lluvias fue similar para ambos períodos, con incrementos de 8 a 2 puntos porcentuales según la profundidad considerada. Este bajo porcentaje se debió a que en general las precipitaciones fueron de escaso volumen (promedio P1: 5 mm; promedio P2: 11 mm), ocurriendo sólo una tormenta de 25 mm durante P1 y tres entre 43 y 55 mm en P2. Las diferencias en humedad edáfica observadas entre ambas épocas del año, correspondieron fundamentalmente a la distinta evapotranspira-

ción ocurrida. Se determinó una regresión lineal significativa entre la humedad del suelo y la altura del curso de agua, medidos ambos parámetros antes de que ocurran las tormentas ($R^2: 0,80$). La altura del tirante de agua previa a las precipitaciones fue significativamente mayor en P1 (25 cm) respecto a P2 (14 cm), comportamiento que se repitió con el pico de crecida (P1: 32 cm; P2: 20 cm). La duración del escurrimiento también fue significativamente diferente en ambas etapas, siendo el tiempo promedio ocurrido desde el inicio de la tormenta hasta que el curso de agua retornó al flujo base de 55 h para P1 y de 30 h en P2. Esta duplicación en la duración del escurrimiento durante el período con suelo más húmedo (P1), fue más evidente en el receso del hidrograma. De esta manera, el tiempo transcurrido desde el pico del hidrograma hasta su flujo base, fue significativamente mayor en P1 (41 h) que en P2 (21 h), mientras que la fase de crecimiento del escurrimiento no fue significativamente diferente entre ambos períodos, a pesar de ser distintos los resultados medios determinados (P1: 14 h; P2: 9 h). La humedad inicial del suelo condiciona fuertemente estos resultados, en un período caracterizado en general por lluvias de escasa magnitud. Es necesario contar con registros de escurrimiento bajo otras condiciones climáticas, estableciendo entonces relaciones lluvia-escurrimiento para una mayor variabilidad climática.

Palabras clave

Escurrimiento, pampa ondulada, siembra directa.

Proceso de evaluación y rediseño de un prototipo de estación de monitoreo hidrológico

Process of evaluation and redesign for a hydrological monitoring station prototype

Clemares Nicolás¹; Moltoni Andrés F.¹; Havrylenko Sofia B.²; Espindola Aime²; Fiorini Correa Julio G.¹

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Ingeniería Rural

² Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Clima y Agua

Resumen

Conocer el valor del nivel del agua y algunos parámetros de calidad, tanto en forma superficial como subterránea es esencial para interpretar y predecir la dinámica de su comportamiento ante distintos escenarios climáticos o sistemas de producción. Las estaciones de monitoreo hidrológico permiten realizar mediciones del agua de manera continua, permitiendo conformar bases de datos hidrológicas cuya información es determinante para los procesos de toma de decisión y tareas de investigación, relacionadas a la producción agrícola, manejo del riego, inundaciones o sequías, entre otros. Para ello, es necesario generar información precisa y exacta con equipos de medición fiables evitando desviaciones en el proceso estudiado. En las innovaciones tecnológicas, como la construcción del prototipo de Limnigrafo-Freatígrafo del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), la posibilidad de realizar ensayos, pruebas e instalaciones a campo son etapas fundamentales. Si bien, esta evolución requiere tiempo y recursos, permite demostrar las funcionalidades de los equipos y mejorar el diseño inicial. En ese contexto, el objetivo general de este trabajo fue mejorar el diseño de hardware y firmware del prototipo de limnigrafo-freatímetro de INTA a partir de su evaluación en laboratorio y campo. El prototipo cuenta con sensor comercial, de tipo hidrostático (exactitud de $\pm 0,5$ % del fondo de escala), un hardware de diseño propio integrado por placas electrónicas interconectadas que permite adquirir los datos, almacenarlos y transmitirlos de forma remota a través de Bluetooth y SMS. Para probar la funcionalidad del equipo en laboratorio, se diseñó y construyó un banco de ensayo en el que se buscó simular las

condiciones de un pozo freaticométrico en un ambiente controlado de laboratorio. La estructura consistió en un caño pluvial de polipropileno opaco, de 110 mm de diámetro y 4 m de altura, amurado en posición vertical nivelado a una pared y sujeto a una base metálica que lo separa del suelo. En el sector superior se introdujeron los sensores hasta la profundidad deseada. En el sector inferior, se ubicó un acceso con tapa roscada, una canilla y una toma de entrada de agua, con el objetivo de regular la altura de la columna de agua. Para visualizar el nivel de la columna de agua contenida en el caño se utilizó el sistema de vasos comunicantes y, paralelo a él, se colocó una manguera de PVC cristal y una regla milimetrada que permitió establecer la altura. El ensayo consistió en comparar la medición del equipo con la escala graduada del visor de altura de agua y con la de un limnigrafo-freatígrafo comercial calibrado e instalado en la misma estructura. Las lecturas se registraron de forma simultánea. De esta forma, se logró verificar la veracidad de los registros y se identificaron algunos puntos de mejora del instrumento. Como resultado se observó una oscilación en la medición, con un rango 17 mm y una media de 7 mm, comprendida dentro de un error admisible y esperado. Para minimizar dicha fluctuación, se agregó un filtro analógico y se trabajó en el filtrado digital del convertor A/D. Es por ello, que uno de los cambios propuestos de diseño, contempla un hardware integrado en una única placa electrónica y que a su vez pueda ser escalable a otros tipos de sensores de medición del agua. Además, se observó que para una mayor precisión en la etapa de evaluación será necesario mejorar el banco de ensayo, de tal forma que permita calibraciones y validaciones de

manera estandarizadas. Por último, se destaca que, en las pruebas de funcionalidad realizadas a campo, el prototipo mantuvo un funcionamiento autónomo, se comportó de forma robusta y cumplió con los parámetros funcionales establecidos en la etapa de diseño.

Palabras clave

Hidrología, instrumento de medición, nivel del agua, precisión.

Tendencias recientes en las lluvias de la Patagonia Austral

Recent trends in rainfall in Southern Patagonia

Díaz Boris G.^{1 3}; Almonacid Leandro R.^{1 2}; Pessacg Natalia L.^{4 5}; Peri Pablo L.^{1 3 5}; González Javier⁶; Colombani Erica N.⁶; Monserrat Cecilia¹

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Patagonia Sur, EEA Santa Cruz

2 Convenio Municipalidad de Río Gallegos – INTA Centro Regional Patagonia Sur

3 Universidad Nacional de la Patagonia Austral

4 Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales

5 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Centro Nacional Patagónico

6 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Patagonia Sur, EEA Chubut

Resumen

El cambio climático se ha vuelto una cuestión de interés global debido, entre otros, al significado de los impactos producidos al ambiente, así como por la incertidumbre en las potenciales consecuencias para la humanidad y sus actividades. El conocimiento de la dinámica espacial y temporal de las lluvias, sus tendencias y patrones es central para la comprensión del clima y la hidrología y, en consecuencia, para la planificación en la agricultura, en la ganadería, así como en otras actividades socioeconómicas. El objetivo del trabajo consistió en la modelización de tendencias en las láminas acumuladas anuales y estacionales de lluvias, en las diferentes regiones hidrográficas (RH) de la Patagonia Austral, mediante el test no paramétrico de Mann Kendall y la determinación de la pendiente de Sen (S), a partir de 99 estaciones de registro de lluvias mensuales disponibles en 26 años continuos (1995 - 2021). El parámetro S se utilizó como un estimador de la tasa de cambio de las lluvias acumuladas por unidad de tiempo.

Los resultados preliminares evidencian una gran heterogeneidad espacial de las tendencias, con un ligero predominio decreciente, tanto para las láminas anuales como en las estacionales. La tendencia promedio regional para lluvias anuales resultó de -5,7 % en 26 años, con un rango de -0,6 % a -24,2 %. En RH de cordillera, éstas resultaron positivas, entre +4,9 % a +20,7 %. Los patrones intra anuales resultaron tan heterogéneos como los interanuales, en las diferentes RH, con un predominio de tendencias positivas en las láminas acumuladas de verano y negativas durante prima-

vera. A nivel regional, el promedio en estas estaciones se encontró en +50,9 % y -9,1 % respectivamente. Un análisis desagregado en las diferentes RH evidencia tendencias negativas críticas en algunas zonas que comienzan a condicionar, en años recientes, a algunas actividades socioeconómicas relevantes para la región, como la ganadería ovina extensiva.

Palabras claves

Clima, cambio climático, precipitaciones.

Efecto de la intensificación en la secuencia de cultivos sobre algunas propiedades edáficas

Effect of intensification in crop sequence on some soil properties

Espindola Aime¹; Gusmerotti Lucas¹; Havrylenko Sofia B.¹; Laghi Joana²; Lisa Juan Carlos³; Castiglioni Mario G.⁴

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Clima y Agua

2 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Suelos

3 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Buenos Aires Norte, EEA Pergamino, AER Rojas

4 Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos

Resumen

La intensificación en la secuencia de cultivos permite un mayor aprovechamiento de los recursos naturales y mejora determinadas propiedades edáficas. Sin embargo, muchos sistemas productivos del norte de la región Pampeana presentan rotaciones solo con cultivos de verano. El objetivo del trabajo fue determinar el efecto de la intensificación en la secuencia de cultivos sobre algunas propiedades edáficas superficiales, en lotes con baja proporción de cultivos invernales. Se trabajó en una microcuenca de 1.000 ha que desemboca en el Arroyo Rojas (Bs. As.). Se extrajeron muestras compuestas (n= 27) del suelo superficial (0-5 cm) de lotes bajo agricultura continua. Se realizaron las siguientes determinaciones: pH, carbono orgánico total y particulado (COT y COP), densidad aparente (DAP), textura, capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y estabilidad estructural, incluyendo los pretratamientos humedecimiento rápido (HR), lento (HL), disgregación mecánica (DM) y su promedio (DMP). Para determinar la historia de uso previa, se realizó una clasificación supervisada del período 2008-2019 para las cuatro estaciones del año. Se empleó la herramienta Random Forest (Google Earth Engine) sobre imágenes Landsat 5 y 8 y los índices normalizados de vegetación y agua (NDVI, GNDVI, NDSI, NDBaI, SAVI, EVI y NDWI). Esto fue reforzado con reconocimiento visual y el análisis del NDVI durante cada campaña. Se utilizaron los siguientes índices: ISI (número de meses con cultivo/número de meses del período analizado), % soja, % maíz y % trigo (proporción de soja, maíz y trigo en la rotación, respectivamente). Los valores de ISI variaron entre

0,48 y 0,62, fundamentalmente por la cantidad de años en que hubo doble cultivo trigo/soja. Así, los resultados de ISI se agruparon en tres categorías: 0,48 a 0,50 (sin doble cultivo), 0,52 a 0,54 (1 doble cultivo) y 0,57 a 0,62 (2 y 3 doble cultivos). La textura del suelo superficial en cada una de estas categorías resultó ser franco-limosa, sin existir diferencias en esta propiedad. Los resultados de HR, DM, HL, DMP y COP mejoraron significativamente en los lotes que se realizaron dos o tres doble cultivos trigo/soja durante el período analizado. Asimismo, no existieron diferencias en dichas propiedades, entre las situaciones con y sin un solo doble cultivo trigo/soja. El análisis de correlación mostró un efecto significativo del ISI y del número de campañas con doble cultivo sobre estas variables (coeficientes de correlación entre 0,58 (DMP) y 0,41 (COP); $p < 0,05$). Las restantes propiedades no respondieron significativamente al distinto grado de intensificación en la secuencia de cultivos. Pese a que entre lotes hubo diferencias en % soja (33 al 100 %, media: 74 %), % maíz (0 al 56 %, media: 14 %) o % trigo (0 al 44 %, media: 25 %), no se determinó su efecto sobre los parámetros analizados. Al acortar el período estudiado a los cinco años más cercanos a la fecha de muestreo, el ISI separó únicamente los resultados de HR y HL, siendo mayores los valores para los índices ubicados entre 0,52 y 0,56, con un solo doble cultivo trigo/soja.

Palabras clave

Imágenes satelitales, historia de uso, doble cultivo anual.

Análisis temporal de la calidad del agua para riego en la cuenca media del río Colorado

Temporal analysis of water quality for irrigation in the middle basin of the Colorado river

Masseroni, María Lujan¹; Aumassanne, Carolina¹; Varela, Ayelen¹; Sartor, Paolo¹; Fontanella, Dardo¹; Perez, María Micaela²

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional La Pampa-San Luis, EEA Anguil, AER 25 de Mayo

2 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional La Pampa-San Luis, EEA Anguil, Laboratorio de Suelos

Resumen

Las características del agua destinada al riego influyen en las propiedades edáficas, el rendimiento de los cultivos, las obras del sistema de riego y el funcionamiento de los equipos de riego presurizados. La calidad del agua para riego está condicionada por las sales (cantidad y tipo) y sedimentos que la constituyen. El monitoreo periódico de la calidad del agua es fundamental para el manejo de las áreas bajo riego. Contar datos actualizados de la calidad del agua y su evolución temporal permite proponer estrategias que reduzcan el daño a los cultivos, causado por la acumulación de sales en los suelos de estas áreas vulnerables. El objetivo de este trabajo fue analizar la calidad del agua del río Colorado, en el Sistema de Aprovechamiento Múltiple del Río Colorado en 25 de Mayo (La Pampa), de los últimos 8 años (2014-2022) y compararlos con la serie histórica (1969-2007). Los parámetros analizados fueron conductividad eléctrica (CE), total de sólidos disueltos (TSD) y pH, obtenidos en el laboratorio de la Agencia de Extensión Rural del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-25 de Mayo y los promedios mensuales históricos generados por el Ente Provincial del río Colorado (Gobierno de La Pampa). Se realizaron tres muestreos semanales, las muestras de agua fueron colectadas en el canal matriz que conduce el agua a toda la zona de regadío de 25 de Mayo, a la altura de la ruta provincial N° 34 a 12,3 km del río (-37.784530 -67.666533), sobre el centro de canal a 0,5 m de profundidad. Las mediciones se determinaron con el analizador multiparamétrico Water Quality Meter (Sper Scientific LTD mod. 850081). Se analizó el comportamiento anual e interanual de los parámetros en este período res-

pecto a los valores medios mensuales de la serie histórica. Los resultados indican que la CE y el TSD medio mensual de los últimos nueve años son superiores al promedio histórico mensual. El pH resultó superior al promedio histórico mensual durante los últimos cinco años analizados, con valores que rondan entre 8,1 y 8,4. Del análisis de los cambios observados se infiere que el aumento de la salinidad (CE y TSD) es debido, principalmente, a la disminución del caudal que se viene registrando en los últimos años. Se observa una relación inversamente proporcional entre la CE y el caudal. Los menores valores de CE y TSD se presentan durante el verano, coincidentes con los valores de mayor caudal, y la mayor demanda de riego. Al ser una cuenca de régimen nival, las oscilaciones de caudal se deben a los aportes de agua por deshielo nival, aunque también se presentan crecidas pluviales de poca duración. El valor máximo de CE admitido, para ingresar a los sistemas de riego en la cuenca, es de 1.800 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, según Programa Único de Habilitación de Áreas de Riego y Distribución de Caudales del río Colorado (1976). Durante la serie de años analizados los valores de CE mínimos y máximos rondan entre 465 y 2.970 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y el TSD varió entre 316 y 2.080 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ respectivamente, presentándose los mínimos en el período de primavera-verano y los máximos en otoño-invierno. En este sentido, a lo largo de los años analizados, se encontraron valores superiores en escasas ocasiones y siempre en el período estival. Esto indica que, si bien el agua del río Colorado está incrementando su salinidad producto de su reducido caudal, los valores monitoreados no superan los límites tolerables para su uso para riego, con algunas excepciones puntuales provocadas por grandes crecidas. La informa-

ción generada contribuye a la toma de decisiones a los organismos encargados de la gestión del agua, a nivel local y de cuenca. En casos que la CE sea una limitante para algunos cultivos, se recomiendan sistemas de riego de alta eficiencia de aplicación que minimicen el aporte de sales al suelo, junto a un adecuado sistema de drenaje, y utilizar cultivos tolerantes a sales.

Palabras clave

Salinidad, conductividad eléctrica, riego.

Recarga artificial del acuífero libre con agua de lluvia para ganadería bovina en el noroeste santafesino

Artificial recharge of the free aquifer with rainwater for cattle farming in the northwest of Santa Fe

Basán Nickisch, Mario H.¹; Tosolini, Rubén Américo²; Sánchez, Luciano Emilio³

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Santa Fe, EEA Reconquista

2 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Santa Fe, EEA Rafaela

Resumen

La ganadería bovina en el noroeste de la provincia de Santa Fe, República Argentina, presenta cíclicamente severos condicionantes en la calidad química del agua para el abrevado de los animales preferentemente, donde los productores experimentan mermas en el stock de cabezas y pérdidas económicas importantes, que suelen ser irre recuperables durante los años hidrológicos secos extremos, por ejemplo, período 2008-2009, o en estos últimos 3 años de sequía extraordinaria en la región. Desde el año 2011 hasta el año 2017 el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) obtuvo datos de variables de alto impacto sobre la incidencia en el mejoramiento de la calidad química del agua para consumo de ganadería bovina de cría, articulando con el Gobierno de la Provincia de Santa Fe y el Instituto Nacional del Agua. Años posteriores a la implementación de la estrategia que aquí se describe, se cotejó con el productor la calidad de las agua explotadas.

El objetivo central del estudio fue dar respuesta con agua en cantidad y calidad para la producción de ganadería bovina de cría con diferentes estrategias de manejo del agua de lluvia y del agua subterránea en el Establecimiento "La Güeya", a 11 km de la ciudad de Tostado, Provincia de Santa Fe, Argentina. Se planificaron y concretaron diferentes alternativas de accesos al agua de calidad disponible en esos ambientes: agua subterránea con exceso de sales y agua meteórica sin sales. Se realizaron estudios previos de imágenes satelitales para identificar zonas de paleocauces y posteriormente realizar prospecciones geoelectricas para ubicar el mejor acceso al agua subterránea mediante perforaciones. Las mismas se diseñaron para extraer y recargar el

acuífero con agua de lluvia simultáneamente, con un diseño inédito, que se fue ajustando en función del funcionamiento logrado en el terreno durante los años de investigaciones, con la impronta de tener un mejor manejo del recurso hídrico en calidad para revertir la limitante hídrica productiva.

Asimismo, se plantearon mecanismos de succión flotantes de los sistemas de bombeo que funcionan dentro de aquellas que presentan estratificación vertical excesiva de sales. La baja permeabilidad del acuífero, al cual se considera un acuitardo, hizo que se concreten diferentes esquemas de varias perforaciones que abastecen a un mismo mecanismo de bombeo, denominados sistemas "patas de araña". Se hicieron diferentes diseños, unos adaptados a los resultados de las prospecciones geoelectricas y otros en base a formas simétricas, para analizar su funcionamiento y respuesta, tanto a la recarga como a la extracción. Se implementaron varias alternativas de sistematización de las áreas de captación para maximizar el escurrimiento superficial hacia los sectores de recarga del acuífero, algo muy importante para años hidrológicos deficitarios. Se concretó la mezcla de agua de todos los sistemas en un tanque central, y desde allí realizar la distribución hacia los diferentes potreros sistematizados, logrando la misma calidad en cualquier lugar y, a su vez, logrando una utilización eficiente de los forrajes en el establecimiento.

Las diferentes estrategias de recarga del acuífero libre con agua de lluvia permiten afirmar hoy que son suficientes para lograr el autoabastecimiento de agua de calidad para los animales, con una utilización intensiva del acuífero libre con exceso de sales beneficiado por la recarga anual

del agua de lluvia (naturalmente sin sales), lo cual ayuda a la conformación de reservorios subterráneos que constituyen bolsones de agua aptos para el consumo ganadero durante todo el año. Desde la implementación de este sistema a la fecha, el productor no ha manifestado problemas con el agua tanto en cantidad como en calidad.

Palabras clave

Uso intensivo del acuífero, acuitardo, recarga artificial del acuífero, calidad del agua para ganadería bovina.

Estimación de la vulnerabilidad y peligro de contaminación del agua subterránea asociado a producciones agroindustriales

Estimation of the vulnerability and danger of groundwater contamination associated with agro-industrial productions

Vuksinic, Evelyn¹; Miguel, Roberto Esteban¹

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Catamarca La Rioja, EEA Chilecito

Resumen

El Valle Central Antinaco Los Colorados (VCALC) presenta un importante desarrollo agrícola y agroindustrial asociado a producciones viti-vinícolas, olivícolas, nogaleras y hortícolas, principalmente tomate. Es una región que ha expresado diversas presiones ambientales en el transcurso de los años, impactando principalmente al recurso hídrico y por ende al desarrollo económico y social de la región. Existen varias publicaciones que advierten sobre los problemas de salinización originados –aunque sin discriminación específica– por retornos de riego y efluentes agroindustriales. Sin embargo, no se han efectuado trabajos que indaguen sobre la vulnerabilidad intrínseca del sistema acuífero y el peligro de contaminación. El objetivo del trabajo es analizar la vulnerabilidad y el peligro de contaminación del sistema hídrico subterráneo, en relación a la actual disposición de efluentes agroindustriales. Para la evaluación de la vulnerabilidad se efectuó el análisis de los factores utilizados en la metodología GOD para el área de estudio: la ocurrencia (G), el sustrato litológico (O) y la profundidad (D) del agua subterránea (Foster e Hirata, 2002). Se determinaron tres tipos de vulnerabilidades: baja, moderada y alta. De las 31 agroindustrias mapeadas, 18 se encuentran en áreas de vulnerabilidad moderada, cuatro en áreas de vulnerabilidad baja y tres en áreas de vulnerabilidad alta. Algunas agroindustrias se ubican en zonas de transición entre vulnerabilidades baja y moderada (tres agroindustrias) y entre vulnerabilidades moderada y alta (tres agroindustrias). Luego, se calculó el Índice de Carga Contaminante (ICC), considerando la carga

contaminante potencial que podría afectar al recurso hídrico subterráneo, a través de los contaminantes cloruro y nitrato. Se analizaron las cuatro características propuestas por la metodología: clase de contaminante, intensidad de la contaminación, modo de disposición y duración de la carga contaminante. Se evaluaron dos metodologías de evaluación del ICC en base a GOD, una ponderada (corrige los valores del índice por un mismo factor) y otra sin ponderar (se posiciona desde la seguridad, evaluando el peor escenario). Para la primera el Índice de Carga Contaminante (ICC) fue “elevado” en la mayoría de las agroindustrias mientras que para el ICC no ponderado el resultado fue “extremo”. Estos valores del ICC podrían disminuirse a través del manejo y gestión de los efluentes, principalmente en medidas que infieran sobre la intensidad de la contaminación y el modo de disposición. Por último, se evaluó el peligro de contaminación del agua subterránea, las dos metodologías resultaron con agroindustrias que se ubican en áreas de peligro moderado-elevado para el ICC ponderado y elevado-extremo para el ICC no ponderado. Más allá de las diferencias, ambas metodologías evidencian que más de 20 agroindustrias (23 ponderadas y 24 sin ponderar) del VCALC se localizan en áreas de peligro elevado de contaminación del recurso hídrico subterráneo. Los resultados evidenciaron que las áreas al sur de la cuenca (Vichigasta y Catinzaco), se encuentran en peligro elevado y extremo de contaminación de agua subterránea e incluso con trabajos que evidencian contaminaciones “consumadas” pero sin determinar su origen a la fecha. Esta situación advierte sobre la necesidad de una ges-

ción integrada de los recursos hídricos, que garantice la calidad del recurso, esencial en el desarrollo productivo del VCALC.

Palabras clave

Contaminación, agroindustrias, efluentes, agua subterránea.

CAPÍTULO 3

***MODELACIÓN,
TELEDETECCIÓN
Y SISTEMAS DE
INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA***

¿Existe erosión hídrica en zonas áridas? Aplicación del modelo USLE en Patagonia*

Is there water erosion in arid lands? USLE model application in Patagonia

Aramayo, Valeria¹; Cremona, María Victoria^{1 2 3}; Castellanos, George^{4 5}; Nosetto, Marcelo D.⁶

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro Regional Patagonia Norte, EEA Bariloche

2 Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias Bariloche (IFAB)

3 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

4 Instituto de Matemática Aplicada San Luis (IMASL)

5 Universidad Nacional de San Luis, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (UNSL-CONICET)

6 Instituto de Matemática Aplicada San Luis (IMASL) – Universidad Nacional de San Luis- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (UNSL-CONICET)

Resumen

La susceptibilidad a la erosión hídrica puede caracterizarse mediante modelos que estiman la pérdida de suelos. En este trabajo aplicamos el modelo USLE (Universal Soil Loss Equation, es decir, Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) para estudiar la susceptibilidad a la erosión hídrica en una cuenca de la región árida de Patagonia donde los datos de campo son limitados. La cuenca bajo estudio es la del A Comallo en el semiárido de Río Negro (lat: -41,02 ; long: -70,2). La topografía es quebrada, con altitudes entre 700 y 1.990 m.s.n.m. Las precipitaciones se concentran en invierno, acumulando en 2018 y 2019 un total de 184 y 211 mm, respectivamente (estación -41,247 , -70,335). El modelo utilizado estima la pérdida de suelos (A) a partir de la obtención y multiplicación de los factores de erosividad de lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), pendiente (L) y largo de pendiente(S), cobertura/uso de la tierra (C) y prácticas de conservación (P). El factor R se definió constante para la cuenca y se aplicó la ecuación de Arnouldus, dado que se cuenta con datos mensuales de la serie 1973-2016 de la estación del Departamento Provincial de Aguas (-41,1 ; -70,36). El factor K se determinó para las unidades cartográficas identificadas en el Inventario integrado de los recursos naturales de la provincia de Río Negro y del relevamiento de mallines. Los factores L y S se generaron en el software Sistema para Análisis Automatizados Geocientíficos (SAGA) sobre imágenes de la Misión Topográfica Shuttle Radar (SRTM), el fac-

tor C se obtuvo a partir de valores de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), generados mediante el procesamiento de imágenes LANDSAT 8 en Google Earth Engine y el factor P para las áreas con lluvias estacionales lleva un valor fijo. Los mapas de los factores y la estimación de A se generaron en QGIS. Se calcularon los estadísticos sobre A para tres subcuencas que componen la cuenca alta del A Comallo. En los tres puntos de cierre se recolectaron sedimentos en suspensión de agosto a diciembre en los últimos 2 años, con colectores adaptados. La estimación de A resultó en un promedio de 37 tn.ha⁻¹.año⁻¹ para toda la cuenca. Para cada una de las tres subcuencas la estimación de A fue: 1) Anecón 58 tn.ha⁻¹.año⁻¹, 2) Quintupanal 28 tn.ha⁻¹.año⁻¹ y 3) del Corral 31 tn.ha⁻¹.año⁻¹, coincidentes con el orden de magnitud informado en otras zonas áridas del mundo. La carga de sedimentos totales en los colectores para 2018 y 2019, siguieron la misma secuencia: 1) Anecón, 2) Quintupanal, y 3) Corral. El modelo USLE permitió estimar la pérdida de suelos, tomando ventaja de herramientas de teledetección y ecuaciones para localidades con escasez de datos. La precisión en los valores estimados es perfectible con el detalle espacial de los datos que originan los factores y con registros sistemáticos de mayor frecuencia temporal para las precipitaciones, que constituyen el factor disparador de erosión hídrica.

Palabras clave

Erosión hídrica, USLE, pérdida de suelos.

* Aramayo, V; Cremona, M.V.; Castellanos, G. y Nosetto, M.D. 2020 ¿Existe erosión hídrica en Zonas Áridas? Aplicación del modelo USLE en Patagonia. Actas XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Corrientes, Argentina, octubre 2020.

Características de las precipitaciones en zonas áridas de la Patagonia Norte, Argentina

Precipitation characteristics in arid zones of North Patagonia, Argentina

Aramayo, Valeria¹; Cremona, María Victoria^{1 2 4}; Fernández, Roberto J.^{3 4}; Nosetto, Marcelo D.^{4 5}

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Patagonia Norte, EEA Bariloche

2 Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias Bariloche (IFAB)

3 Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Instituto de Investigaciones Fisiológicas y Ecológicas Vinculadas a la Agricultura

4 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

5 Universidad Nacional de San Luis, Instituto de Matemática Aplicada San Luis (IMASL)

Resumen

Dada la importancia de las precipitaciones en los sistemas productivos de zonas

áridas, no solo como un recurso ecológico fundamental sino también como un factor que puede originar perjuicios asociadas a procesos erosivos, resulta fundamental su estudio, en especial en áreas extensas y de baja densidad de registros como la Patagonia Norte. El objetivo de este trabajo es caracterizar la variación temporal y espacial de las precipitaciones, y evaluar productos satelitales de estimación de este parámetro para el oeste de la provincia de Río Negro, una región comprendida entre las latitudes 41 y 41,5 S y longitudes 70,5 y 70 O que contiene a la cuenca alta del arroyo Comallo. Con los registros diarios del período 1956-2019 de seis estaciones pluviométricas de bases públicas y de establecimientos privados ubicadas en esa región, se calculó la precipitación acumulada mensual, estacional y anual, sus promedios y tendencias. Además, se evaluó la correlación de esos registros con los productos satelitales GPM (Global Precipitation Measurement) y TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) que se obtuvieron de la plataforma web Giovanni (NASA, <https://giovanni.gsfc.nasa.gov>, calculándose el coeficiente de determinación (R²) y el error medio de estimación (RMSE). La precipitación anual varió entre 100 y 640 mm.año⁻¹, con una media entre 100 y 300 mm.año⁻¹ en los últimos cinco años, y tendencia decreciente en las últimas dos décadas. Se detectó una tendencia decreciente en el número de días con precipitación por año y de las precipitaciones inferiores a 10 mm.día⁻¹. La pre-

cipitación media diaria mostró una leve tendencia al aumento igual que los registros mayores a 10 mm.día⁻¹. GPM representó mejor la variabilidad, pero ninguno de los dos productos captó la magnitud de las precipitaciones. Es necesario continuar con actualizaciones, datos de mayor detalle y seguimiento de la variabilidad de las precipitaciones.

Palabras clave

Precipitación, Patagonia árida, variabilidad de precipitación, tendencias de precipitación.

Caracterización morfométrica como entorno de la erosión hídrica en la cuenca alta del arroyo Comallo (Río Negro, Argentina)

Morphometric characterization as water erosion environment in the Comallo upper basin (Rio Negro, Argentina)

Aramayo, Valeria¹; Cremona, María Victoria^{1 2 3}; Enriquez, Andrea S.^{1 2 3}; Nosetto, Marcelo D.^{3 4}

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro Regional Patagonia Norte, EEA Bariloche

2 Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias Bariloche (IFAB)

3 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

4 Universidad Nacional de San Luis-Instituto de Matemática Aplicada San Luis (IMASL)

Resumen

El potencial incremento de los eventos extremos en zonas áridas asociado al cambio climático proyecta aumentos en las tasas de erosión hídrica. Mejorar el conocimiento sobre la topografía, el estado actual de erosión y los patrones del drenaje regional con enfoque de cuenca, puede contribuir a reducir la vulnerabilidad de los sistemas. El objetivo de este trabajo fue caracterizar la superficie de las sub-cuencas de la cuenca alta del arroyo Comallo, a fin de aportar a la construcción del escenario del proceso de erosión hídrica en zonas áridas de la Patagonia Norte. Se describieron tres sub-cuencas en la cabecera del arroyo Comallo y una cuarta con punto de cierre aguas abajo. Estas cuatro sub-cuencas se caracterizan morfométricamente a partir del modelo digital Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) en entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG). En base a la morfometría, se calcularon índices relacionados a la generación de escurrimiento: densidad de drenaje, frecuencia de cauces, compacidad, bifurcación, relación de longitud de cauces, coeficiente de torrencialidad, y coeficiente de almacenamiento hídrico. Los valores obtenidos para las sub-cuencas indicarían mayor entrega de agua y sedimentos aguas debajo de la naciente al este. Ante la escasez de registros hidrológicos regionales, esta información permite avanzar en la comprensión de la posible respuesta a eventos climáticos, mediada por las características físicas de la cuenca.

Palabras clave

Parámetros morfométricos, índices morfométricos, cuencas, teledetección.

Introducción

Existe un potencial de incremento de las tasas de erosión hídrica a nivel global debido al cambio climático (Nearing et al., 2005) que puede reducirse con medidas de conservación planificadas sobre sólidos conocimientos de la topografía, estado actual de erosión y patrones del drenaje regional (Sreedevi et al., 2013). El enfoque de cuencas brinda un marco propicio para las acciones de gestión del agua en pos de la conservación de los recursos y del aprovechamiento racional del agua, entendido como recurso integrador. La cuenca, desde una mirada sistémica, funciona como un todo indivisible e interdependiente, en el que se relacionan aspectos sociales, culturales, económicos, políticos, administrativos, tecnológicos, productivos, biológicos y físicos (Reyes Trujillo et al., 2010). Es por ello que, aunque dos cuencas tengan igual forma, la respuesta hidrológica en cada una de ellas puede ser diferente. El desafío de la planificación integral de cuencas debe comenzar en el conocimiento de los aspectos antes mencionados.

En el norte de la Patagonia, la ganadería extensiva es la forma de uso de suelo mayoritario en las áreas de aporte de las cuencas de los principales arroyos y ríos. Los pastizales en la zona más alta de una cuenca, además de producir forraje con los recursos agua y suelo a nivel local,

son fuente importante de recarga de agua superficial y subsuperficial de los cursos de agua. Los escurrimientos en esta región se dan en los meses de invierno (julio-agosto) en forma coincidente con las mínimas temperaturas, y desacopladas de la demanda por evapotranspiración que es máxima en verano (Ciari, 2009; Aguiar et al., 1996; Milkovic et al., 2019). Se ha estudiado que la topografía determina fuertemente la predisposición a la erosión hídrica (Aramayo, en preparación), que las precipitaciones se concentran en invierno y que la frecuencia de eventos de precipitación extremos es menor a uno por año. Además, se encontraron tendencias a la reducción de la precipitación anual y al aumento de la frecuencia de precipitaciones mayores a 40 mm.día⁻¹ (Aramayo et al., 2022).

La medición y valoración de la superficie de las cuencas y dimensión de sus geoformas es objeto de estudio de la morfometría. En la actualidad, la teledetección y los SIG permiten la caracterización espacio-temporal de las propiedades morfométricas de las cuencas hídricas, de sus parámetros de relieve y de las redes de drenaje (Horton, 1945). Esta información brinda indicios de la respuesta ante las precipitaciones (Gaspari et al., 2013; Brieva, 2018), ya sean medias, torrenciales (Esper Angillieri, 2008), extremas (Genchi et al., 2016) o nivales (Aumassanne et al., 2018). Esto último es especialmente valorado en regiones con escasez de mediciones de campo (Quiroga et al., 2017). El objetivo de este trabajo fue caracterizar la superficie de las sub-cuencas en la cuenca alta del arroyo Comallo, a fin de aportar información para la construcción del escenario del proceso de erosión hídrica en zonas áridas de la Patagonia Norte, con natural déficit hídrico pero con proyección de incrementos en eventos de lluvias extremas.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio es la cuenca alta del arroyo Comallo, en la región semiárida de Río Negro (41,02 Sur; 70,2 oeste), de aproximadamente 2.000 km². El arroyo Comallo se ubica al suroeste de la provincia de Río Negro y recorre cerca de 120 km en sentido sur-norte, desde sus nacientes en las laderas septentrionales del macizo Anecón Grande hasta su desembocadura en el río Limay (Figura 1). Recorre una topografía quebrada con altitudes de entre 700 y 1.990 m.s.n.m., tiene pocos afluentes y variaciones estacionales de caudal muy marcadas. Los aluviones y torrentes de barro son frecuentes y han sido registrados en cercanías de la zona urbana como respuesta a avenidas pluviales de importancia (Prez y Massaferro, 2013). El clima de esta zona corresponde a la categoría BSk de Köppen, de estepa fría, semiárida, con nevadas en los campos altos, lluvias invernales y marcado déficit de humedad en el verano. La precipitación media anual registrada en la estación del Departamento Provincial de Agua (DPA), (41,1 S; 70,36 O) para la serie 1974-2016 es de 224 mm. Las temperaturas medias son de 16,4 °C para el mes de enero y de 2,3 °C para julio (Massaferro et al., 2012; Gaitán et al., 2004).

En la cabecera de la cuenca se originan dos cauces que aportan al Comallo. Por el oeste ingresa el arroyo Quintupanal, que nace en la ladera occidental del cerro Anecón Grande; en su recorrido atraviesa varios mallines y recibe el aporte de cañadones y arroyos menores. Por otro lado, el arroyo Anecón nace en la ladera oriental del cerro que le da su nombre; sus aguas corren por un cauce frecuentemente profundizado y ancho que denota el paso de grandes crecientes de origen torrencial. El Anecón recibe el aporte del arroyo

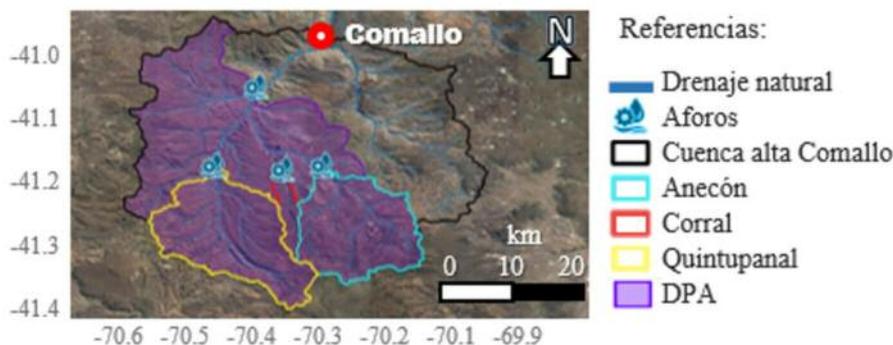


Figura 1. Área de estudio

del Corral y se une al Quintupanal aguas abajo del mismo punto (Prez y Massafferro, 2013). Aguas abajo, en un cuarto punto de cierre sobre el arroyo Comallo (41,11°S; 70,37° O), se ubica una estación hidrométrica del DPA, con un área de aporte de 1248 km².

Morfometría de cuencas

La caracterización de los parámetros e índices morfométricos de las subcuencas (DPA, que inclu-

ye Anecón, Corral y Quintupanal, Figura 1) se realizó sobre el modelo digital de elevación derivado del producto SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, NASA 2013) adquirido del sitio web de libre acceso earthexplorer.usgs.gov. La determinación de variables morfométricas se realizó en Quantum GIS (Conrad et al.,2015, QGIS 2023) utilizando el complemento SAGA (System for Automated Geoscientific Analysys) para la delimitación de divisorias. Los parámetros utilizados en

Parámetros morfométricos	Aplicación	Sigla/Cálculo
Área (km ²)	Tamaño y forma de la cuenca.	A
Perímetro (km)	Área que encierra la divisoria de aguas y longitud de la divisoria.	P
Longitud total drenaje (km)	Largo total del drenaje y del cauce principal.	Ld
Longitud del canal principal (km)	Largo total del cauce principal.	Lc
Desnivel (m)	Desnivel total de la cuenca.	H
Longitud axial de la cuenca (km)	Distancia desde el punto más alejado en dirección al punto de cierre sobre el cauce principal.	La
Número de cauces de orden 1	Cantidad de cauces de orden 1, debido a su génesis por formación de surcos, se los relaciona con mayores tasas de erosión.	N1
Número de cauces de todos los órdenes	Cantidad de cauces.	Nm
Pendiente de los cauces (%)	Desnivel de los cauces se puede asociar al gradiente hacia la salida de la cuenca.	S
Índices morfométricos		
Densidad de drenaje (km/km ²)	Representa la eficiencia de la red de drenaje. Los valores bajos suelen corresponderse a superficies permeables, de relieve suave y resistentes a erosión.	$Dd = Ld/A$
Frecuencia de cauces	Representa la intensidad de los procesos de erosión hídrica concentrada.	$f = Nm/ A$
Índice de compacidad	Valores cercanos a 1 la cuenca tiende a ser redonda, con mayor peligrosidad a crecidas, con menor tiempo de concentración.	$Kc = P / (2 \sqrt{\pi A})$
Índice de bifurcación	Proporción entre el número de cauces de determinado orden con los del orden anterior, indica.	$Rb = Nu/Nu-1$
Relación de longitud de los cauces	Proporción de incrementos en la longitud de los cauces a medida que aumenta el número de órdenes.	$RI = Lu/Lu-1$
Coefficiente de torrencialidad	Indica la erodabilidad, está relacionado a los procesos de erosión lineal y a la capacidad de descarga de la cuenca. Altos valores indican elevada susceptibilidad a la erosión.	$CT = N1/A$
Coefficiente de almacenamiento hídrico	Permite evaluar la capacidad de almacenamiento de la red de drenaje, indica el grado de modulación de la intensidad de una crecida.	$RHO = RI/Rb$

Tabla 1. Parámetros e índices morfométricos empleados en la caracterización de las sub-cuencas.

Fuente: Elaboración propia

la descripción de las sub-cuencas fueron: área, perímetro, longitud total del drenaje, longitud del canal principal, desnivel total, longitud axial, número de cauces de orden 1 (siendo 1 el valor correspondiente al primer cauce sin tributarios y creciente hacia el cauce en la salida, según Strahler (1957)), número de cauces de todos los órdenes y pendiente de los cauces. A su vez, los índices construidos en base a esos parámetros fueron: densidad de drenaje, frecuencia de cauces, índice de compacidad, índice de bifurcación, relación de longitud de los cauces, coeficiente de torrencialidad y coeficiente de almacenamiento hídrico (Horton, 1945; Reyes Trujillo et al., 2010; Busnelli y Horta 2014). Estos descriptores han sido utilizados ampliamente desde el nacimiento de la morfometría de cuencas (Harlin, 1984). La obtención y aplicación de los parámetros e índices se detallan en la Tabla 1.

Resultados y discusión

Morfometría de cuencas

Las sub-cuencas en estudio denotaron diferencias en forma y tamaño entre ellas, desde 35 km² de superficie y 18 km de drenaje en el Corral hasta 1.280 km² y 260 km de longitud de drenaje en la sub-cuenca DPA (Tabla 2). Las características morfométricas referidas al tamaño y la forma muestra-

ron variaciones que luego no se reflejaron de la misma forma en los índices.

En primer lugar, más allá de las dimensiones, los resultados de las cuatro sub-cuencas estuvieron contenidos en rangos acotados para algunos parámetros e índices morfométricos. Por ejemplo, la pendiente de los cauces con un mínimo de 2,04 % en el arroyo Corral y un máximo de 2,62 % en el Anecón, la densidad de drenaje varió entre 0,4 (Corral) y 0,54 (Quintupanal) y la relación de longitud de cauces varió entre 0,41 (Corral) y 0,46 (Quintupanal) (Tabla 2). Esto resulta interesante por el potencial de extrapolación de medidas morfométricas en el territorio.

Los índices relacionados al potencial de erosión y la peligrosidad de crecidas como la frecuencia de cauces, el índice de compacidad y el coeficiente de torrencialidad, son menores en la sub-cuenca Corral y mayores en la sub-cuenca Anecón. La sub-cuenca Quintupanal, aunque semejante en tamaño y longitud del drenaje respecto de Anecón, presentó índices de menor potencial de erosión y escurrimiento. A su vez, el coeficiente de almacenamiento hídrico que representa el nivel de atenuación de crecidas, es menor en Anecón y mayor en el Corral. La sub-cuenca DPA, de mayor tamaño y longitud de drenaje, tuvo un coeficiente de almacenamiento igual a Quintupanal y coeficien-

		Subcuenca			
		Anecón	Corral	Quintupanal	DPA
P A R Á M E T R O S	Área (km ²)	278	35	326	1280
	Perímetro (km)	82	38	96	260
	Longitud total drenaje (km)	127	14	175	541
	Longitud del canal principal (km)	27	8	32	46
	Desnivel (m)	1000	705	1020	1160
	Longitud axial (km)	22	15	27	40
	N1	31	2	33	98
	Nm	61	3	65	269
	Pendiente de los cauces (%)	2,62	2,04	2,51	2,21
	Densidad de drenaje (km.(km ²) ⁻¹)	0,46	0,40	0,54	0,42
Í N D I C E S	Frecuencia de cauces	0,22	0,09	0,20	0,21
	Índice de compacidad	1,39	1,81	1,50	2,05
	Índice de bifurcación	4,79	2,00	3,40	3,01
	Relación de longitud de los cauces	0,45	0,41	0,46	0,43
	Coef. de torrencialidad	0,11	0,06	0,10	0,08
	Coef. de almacenamiento hídrico	0,09	0,21	0,14	0,14
Suma de índices		7,4	4,8	6,2	6,2

Tabla 2. Parámetros e índices morfométricos empleados en la caracterización de las sub-cuencas.

te de torrencialidad de los más bajos (Tabla 2). Para estos índices asociados a la pérdida de agua y suelo hubo mayor variabilidad dada la combinación particular de parámetros morfométricos en cada subcuenca. La especificidad a este nivel, es importante a la hora de generar modelos de la dinámica hidrológica y movimiento de sedimentos. Las herramientas de descripción utilizadas fueron replicadas en múltiples cuencas a lo largo del país (Brieva, 2018) y resultaron de utilidad para la interpretación de procesos hidrológicos en la Patagonia para otras regiones áridas y semiáridas (Esper Angillieri, 2008,; Genchi et al.,2016, Quiroga et al.,2017, Aumassanne et al.,2018).

Dada la ubicación de las sub-cuencas, la naciente al sud-este resultó de mayor peligrosidad a crecidas y por lo tanto mayor potencial erosión hídrica. Lo anterior, sumado a la baja modulación de eventos torrenciales, indicada por el coeficiente de almacenamiento hídrico, anticipan que la respuesta hidrológica es diferente al este y oeste de la cuenca Alta del Comallo. En este contexto, con expectativas de aumento en los eventos climáticos extremos (Aramayo et al.,2022), se puede esperar mayor grado de susceptibilidad y mayor exportación de recursos fuera de la sub-cuenca Anecón que en las demás. Esta caracterización física de las sub-cuencas brindó el panorama para una futura evaluación del agua disponible y planificación del uso del recurso.

Conclusiones

Un mejor entendimiento de los flujos de agua en la cuenca promueve su buen manejo y conservación. Los resultados presentados en este trabajo permiten avanzar en la comprensión de la posible respuesta a eventos de precipitación, mediada por las características físicas de la cuenca con fuerte influencia sobre algunos índices y no tanto para otros. Las herramientas de teledetección y SIG aportaron una base valiosa de abordaje en esta región de difícil acceso y sin registros locales. La caracterización morfométrica constituye un primer paso en la comprensión de los procesos a escala de cuenca para la valoración de los recursos y el aprovechamiento racional del agua. Este trabajo de descripción hidrológica de la cuenca Alta del arroyo Comallo continúa con los estudios de respuesta del caudal a las precipitaciones.

Bibliografía

- Aguiar, M. R., Paruelo, J. M., Sala, O. E. y Lauenroth, W. K. (1996). Ecosystem responses to changes in plant functional type composition: an example from the Patagonian steppe. *Journal of vegetation science*, 7(3), 381-390.
- Aramayo, V. (en preparación). Hidrología y erosión hídrica evaluadas para una cuenca de la Patagonia Norte. [Tesis del Doctorado en Ciencias Agropecuarias FAUBA].
- Aramayo, V., Cremona, M. V., Fernández, R. J., & Noretto, M. D. (2022). Características de las precipitaciones en zonas áridas de la Patagonia Norte, Argentina. *Cuadernos del CURIHAM*, 28.
- Aumassanne, C. M., Gaspari, F. J., Bege, M. E., Sartor, P. D., Oricchio, P. y Di Bella, C. M. (2018). Morfometría de la cuenca alta del río Colorado, Argentina. *Boletín geográfico*, 1(40), 13-17.
- Brieva, C. (2018). Caracterización de cuencas. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Mendoza. 161 pp.
- Busnelli, J. y Horta, L. R. (2014). Morfometría de cuencas montañas y metamorfosis fluvial, Tucumán. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 71(1), 11-20.
- Ciari, G. (2009). Transferencia y Exportación de Recursos en una Cuenca Serrana de Patagonia Extra Andina. [Tesis de Magister, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales-Universidad Nacional de La Plata].
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., y Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, *Geosci. Model Dev.*, 8, 1991-2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.
- Esper Angillieri, M. Y. (2008). Morphometric analysis of Colangüil river basin and flash flood hazard, San Juan, Argentina. *Environmental geology*, 55, 107-111.
- Gaitán, J. J., López, C., Ayesa, J., Bran, D. y Umaña, F. (2004). Características y distribución espacial de los paisajes y los suelos del área Bariloche-Comallo. Área de Recursos Naturales Relevamiento integrado. INTA EEA Bariloche Comunicación Técnica 98:1-44.
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I. y Besteiro, S. (2013). Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. Series: Libros de Cátedra. 1a ed. La Plata. Universidad Nacional de La Plata.
- Genchi, S. A., Vitale, A. J., Perillo, G. M. y Piccolo, M. C. (2016). Geomorphometric assessment of drainage systems in a semi-arid region of Argentina using geospatial tools and multivariate statistics. *Earth Science Informatics*, 9, 309-324.
- Harlin, J. M. (1984). Watershed morphometry and time to hydrograph peak. *Journal of Hydrology*, 67(1-

4), 141-154.

- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysiscal approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America* 56: 275-370
- Massafiero, G. I., Arrigoni, G. I., Boschín, M. T., Fernández, M. M., Crivelli, E. A., y Cordero, J. A. (2012). Indicadores de tecnología y etnodinamia: el análisis de pigmentos en el paraje arqueológico Comallo Arriba, provincia de Río Negro, Argentina. *Boletín del Museo Chileno de Arte Precolombino*, 17(1), 117-127.
- Milkovic, M., Paruelo, J. M. y Noretto, M. D. (2019). Hydrological impacts of afforestation in the semiarid Patagonia: A modelling approach. *Ecohydrology*, 12(6), e2113.
- Nearing, M. A., Jetten, V., Baffaut, C., Cerdan, O., Couturier, A., Hernandez, M. y Van Oost, K. (2005). Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena*, 61(2-3), 131-154.
- Prez, H. y Massafiero, G. (2013). Geología y geomorfología del tramo superior del arroyo Comallo, Río Negro. *Contribuciones científicas GAEA*, 26: 221-234.
- QGIS.org (2023). QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- Quiroga, D. R. A., Gil, V. y Coronato, A. (2017). Quantitative geomorphology applied to fluvial dynamic in Aviles and Moneta basins, Tierra Del Fuego, Southern Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 76, 1-10.
- Reyes Trujillo, A., Barroso, F. U. y Carvajal Escobar, Y. (2010). Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas. Programa Editorial UNIVALLE.
- Sreedevi, P. D., Sreekanth, P. D., Khan, H. H., y Ahmed, S. (2013). Drainage morphometry and its influence on hydrology in a semi arid region: using SRTM data and GIS. *Environmental earth sciences*, 70, 839-848.
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913-920.

Estudio satelital multitemporal de la alta cuenca del río Colorado para contribuir a la gestión sustentable del agua

Multitemporal satellite study of the upper Colorado river basin to contribute to sustainable water management

Aumassanne Carolina¹; Solorza Romina²; Salcedo Ana Paula³; Teverovsky Sofia²; Machado Federico²; Soldano Alvaro²; Bonilla Jorge³; Fontanella Dardo¹

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional La Pampa-San Luis, EEA Anguil, AER 25 de Mayo

2 Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Gerencia de Observación de la Tierra. Centro Espacial Teófilo Tabanera

3 Instituto Nacional del Agua (INA). Subgerencia Centro Regional Andino

Resumen

La cuenca del río Colorado tiene su origen en la Cordillera de los Andes y recorre el país a lo largo de más de 1200 km para desaguar en el Océano Atlántico. Debido a que numerosos usos del agua en toda la cuenca dependen de su caudal, resulta indispensable conocer la dinámica de las variables hidrometeorológicas que tienen lugar en la naciente. Este trabajo tiene como objetivo el estudio de parámetros hidro-morfológicos a través de datos satelitales multifrecuencia, centrandose su atención en la cuenca alta, donde se ubica una de las subcuencas aporte: Valle Hermoso. Se propone el uso de datos satelitales de distintas fuentes: ópticos (MODIS, Landsat 5, 8 y 9, Sentinel 2), radar (Sentinel 1 y SAOCOM), modelos digitales del terreno y datos de estaciones in situ que miden parámetros nivométricos e hidrológicos. Se construyó cartografía de superficie total cubierta de nieve, se estimó la nieve en proceso de fusión, y se analizó espacial y temporalmente su relación con las características topográficas. Se destaca en este estudio el uso de distintas fuentes de datos y software, como la plataforma de procesamiento de grandes volúmenes de datos Google Earth Engine para la comprensión de la dinámica temporal de las variables estudiadas.

Palabras clave

Nieve, teledetección, cuenca, río Colorado.

Introducción

La nieve acumulada durante el invierno en las cuencas del centro-oeste de Argentina constituye

el principal suministro de agua para el consumo humano, la agricultura y la industria. La cuenca del río Colorado tiene un régimen hidrológico que depende casi exclusivamente del agua de deshielo, por lo que existe una estrecha relación entre la nieve caída en el invierno en la alta cuenca y los caudales durante la primavera-verano. Para cuantificar la acumulación y posterior fusión de la nieve, los datos de estaciones meteorológicas no son suficientes para cuencas de grandes extensiones debido, principalmente, a su baja representatividad espacial y la imposibilidad de caracterizar la enorme variabilidad de ambientes y condiciones existentes en áreas de montaña. Por eso, los datos satelitales ópticos y de radar ayudan a sobrepasar esta limitación, brindando información de la nieve en distintas regiones del espectro electromagnético y en un continuo espacio-temporal. En las zonas montañosas de Argentina, se cuenta con antecedentes de estudios sobre la dinámica nival asistida por sensores remotos. Cogliati, et al. (2015) y Cara, et al. (2016) han realizado importantes aportes en el estudio de la dinámica nival con datos ópticos, en la alta cuenca del río Neuquén y la cuenca superior del río Mendoza, respectivamente. Por otro lado, la nieve de fusión ha sido estudiada en base a datos de radar (Salcedo y Cogliati 2014; Solorza et al. 2016; Teverovsky et al. 2018). Aumassanne et al. (2015, 2019 y 2022) plantearon los primeros antecedentes de estudios multitemporales para la cuenca alta del río Colorado.

La cuenca del Colorado, inmersa en un sistema árido, experimenta una situación hidrometeorológica

gica crítica en los últimos 12 años producto de la variabilidad natural propia del sistema y del cambio climático global, atravesando el período seco más extenso que se ha registrado en las bases de datos hidrométricas disponibles (64 años). De hecho, para esta nueva situación que se presenta en los Andes centrales de Argentina, en la reciente bibliografía científica se considera el término de “mega sequía”, que se caracteriza por un aumento en la temperatura media anual del aire de $\sim 0,8$ C y una reducción de las precipitaciones anuales del 40 % (Garreaud et al. 2017; Rivera, et al. 2022). El río Colorado se origina de la confluencia de dos de sus principales afluentes, los ríos Grande y Barrancas, y recorre alrededor de 1.200 km atravesando parte de las provincias de Mendoza, Neuquén, Río Negro, La Pampa y Buenos Aires hasta su desembocadura en el océano Atlántico. Tiene un derrame anual promedio de 4.380 Hm³ y una superficie total de drenaje de 47.459 km². Su caudal medio anual es de 138,8 m³.s⁻¹ (COIRCO, 2015), caracterizado por una marcada estacionalidad primavero-estival, atribuida a su régimen principalmente nival. La importancia del río Colorado en la región, radica en que es la principal, y en muchos casos única, fuente de abastecimiento de agua de las poblaciones para diversos usos en toda la diagonal árida de las cinco provincias que recorre y de otras poblaciones extra-cuenca. Por lo tanto, estudiar la principal entrada del ciclo hidrológico, la nieve, es de interés regional y nacional para el manejo sustentable de este importante recurso hídrico de los Andes semiáridos de la República Argentina.

Este trabajo se enmarca en una estrategia de monitoreo del río Colorado establecida bajo un convenio estratégico interinstitucional de cooperación técnica entre la CONAE, el INTA y el INA, entendiendo que la información generada resulta clave para la gestión y aprovechamiento sostenible del recurso, y para minimizar los impactos y riesgos en la gestión integrada del agua. Para definir y calibrar las metodologías, se definió una zona piloto de estudio en cercanías de la estación Valle Hermoso, y en base a los lineamientos de trabajo establecidos en este convenio, los objetivos de este trabajo son los siguientes: 1) Construir una base integrada de datos satelitales y de campo para asistir al estudio espacial y temporal de la cuenca; 2) Construir información topográfi-

ca de alta resolución para conocer los principales parámetros morfométricos, entendiendo que el funcionamiento de una cuenca depende de sus características físicas; 3) Definir metodologías para asistir al estudio de la dinámica de la nieve en la alta cuenca, como variable biofísica principal de aporte a toda la cuenca; 4) Establecer lineamientos de uso de estas variables para el manejo integrado del recurso agua. Se exponen los logros alcanzados en esta temática en el primer año de vigencia del convenio, aunque también se exponen los lineamientos futuros de trabajo. Se espera que los resultados de este proyecto aporten a la comprensión de la dinámica espacial y temporal de la nieve en alta cordillera y la oferta hídrica de la cuenca, y sienten las bases para contribuir al manejo integrado y sostenible del recurso agua en toda la cuenca.

Área de estudio

Para alcanzar los objetivos, se definió como área de estudio al sitio piloto denominado Valle Hermoso, ubicado en el sector más septentrional de la cuenca del río Grande (Figura 1). Los criterios claves a la hora de definir el área de estudio fueron la cercanía a la estación nivológica homónima y la estación de aforo La Estrechura ubicada a 20 kilómetros aguas abajo.

La cuenca del río Grande está situada enteramente en la provincia de Mendoza, con sus nacientes en el macizo central de Los Andes, que limita con Chile, siendo sus principales tributarios los ríos Cobre y Tordillo. Posee un régimen hidrológico casi exclusivamente nival y su caudal medio anual en la estación de aforo de la Estrechura es de 32,17 m³.s⁻¹ (COIRCO, 2013), con un caudal promedio mínimo mensual de 14 m³.s⁻¹ en períodos de estiaje y un caudal máximo mensual de 62,8 m³.s⁻¹ en épocas de intenso deshielo (Figura 2, izquierda). La cuenca del río Grande, al igual que el resto de las cuencas de origen nival con nacimiento en el centro oeste de Argentina está atravesando por un período seco, registrando a la fecha doce ciclos hidrológicos con derrames por debajo del promedio histórico, como puede observarse en la Figura 2 (derecha) a partir del año 2010.

Datos utilizados

Para la obtención de parámetros morfométricos

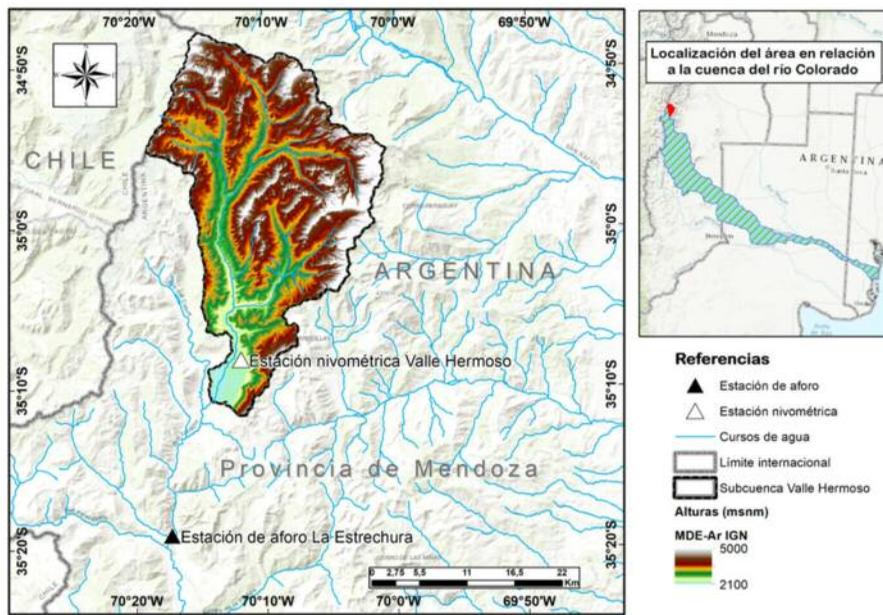


Figura 1. Localización del área de estudio: Valle Hermoso, cuenca alta del río Grande, Argentina y de las estaciones de medición *in situ*.

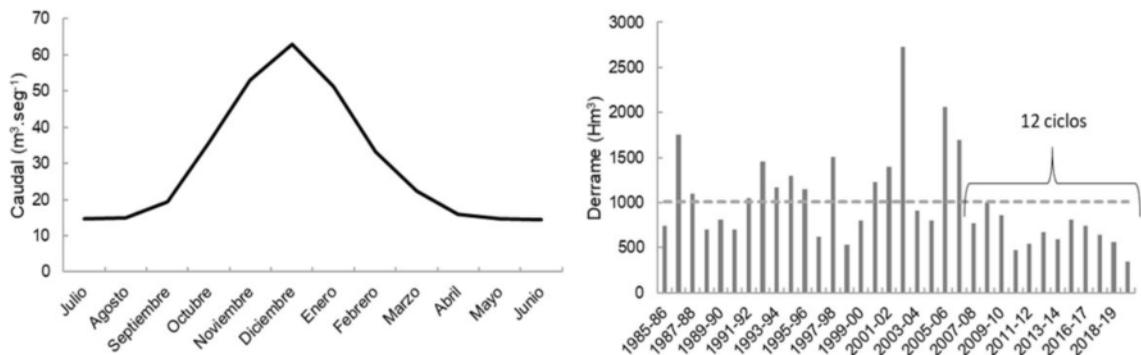


Figura 2. Izquierda, caudal (m³·seg⁻¹) promedio mensual. Derecha. Derrame (Hm³) del río Grande en la estación de aforo La Estrechura periodo 1985-2020.

cos, se construyó un mosaico digital de la zona de estudio en base al Modelo Digital de Elevaciones de Argentina del Instituto Geográfico Nacional (<https://www.ign.gov.ar>). El mismo tiene 30 m de resolución espacial y una precisión vertical de aproximadamente 2 m.

Para la estimación de la nieve total caída se utilizaron datos MODIS, Landsat 5, 8 y 9 y Sentinel 2. Se utilizó el producto satelital MOD10A2 (<https://nsidc.org/data/mod10a2>), de 500 metros de resolución espacial con resolución temporal cada 8 días, durante los 22 años de análisis. Se utilizaron imágenes Landsat 5 TM, 8 OLI y 9 OLI-2 (repositorio disponible en <https://earthengine.google.com/>) para la construcción de series temporales de cobertura total de nieve caída construyendo algoritmos de estimación en Google Earth Engine (GEE) para obte-

ner la serie histórica. Su resolución espacial es de 30 m y el período de revisita combinando Landsat 8 y Landsat 9 es de 8 días. Considerando la disponibilidad de una resolución espacial más precisa, 10 m, se construyeron también mapas de cobertura de nieve con imágenes Sentinel 2A y 2B, misión satelital multiespectral del Programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA). En todos los casos, y adecuando el uso radiométrico de las bandas de cada sensor, la variable principal obtenida fue el Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI), obteniendo la superficie cubierta de nieve en Km². También, se utilizaron datos SAR para la obtención de la nieve de fusión. Se utilizaron datos Sentinel 1A y 1B (banda C, frecuencia de 5,4 GHz, 5,54 cm de longitud de onda), también de la ESA. Se utilizó el modo de adquisición TopSAR Interferometric Wide Swath

(IW) que realiza adquisiciones sobre Argentina cada 12 días, que se adquieren desde el año 2014 a la actualidad. Se utilizó el nivel de procesamiento Ground Range Detected (L-1 GRD). Además, se utilizaron datos SAOCOM 1A y 1B (banda L, frecuencia 1.2 GHz, 235 cm de longitud de onda), misión SAR de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales de Argentina (CONAE). Se utilizó el modo de adquisición StripMap y el nivel de procesamiento L1A. Se cuenta con datos desde octubre de 2018 a la actualidad.

Las imágenes Sentinel 1 (descargadas desde <https://search.asf.alaska.edu/>), se utilizaron para la construcción de la máscara de distorsiones geométricas mientras que para la estimación de la nieve de fusión se procesó toda colección en GEE. Se seleccionaron imágenes con las siguientes características: 1) imágenes con nieves eternas (verano), de períodos con caída de nieve (invierno) y con presencia de nieve húmeda (primavera); 2) frecuencia de adquisición de al menos una imagen cada 2 meses; y 3) imágenes con la misma geometría de adquisición (ángulo de incidencia 40°, polarización VV y órbita descendente).

Las imágenes SAOCOM (disponibles en <https://catalog.saocom.conae.gov.ar/>), se utilizaron para la construcción de la metodología para estimar EAN (Equivalente en Agua de Nieve) en base a imágenes SAR. Se descargaron, también, considerando misma geometría de adquisición (modo StripMap, Beam S4, pasadas Ascendentes y polarización HH/VH).

En cuanto a datos de campo, se utilizaron los registros de EAN de la estación Valle Hermoso, que pertenece al Sistema de Información Hidronivometeorológico del Departamento General de Irrigación (Mendoza), y de caudal de la estación de aforo La Estrechura (Figura 1). Los datos fueron descargados del Sistema Nacional de Información Hídrica de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Nación (disponibles en <http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar/>). Se utilizaron datos diarios de ambas variables de la serie 2000-2021, aunque aún no están disponibles los datos del último año bajo análisis. En el caso del EAN los registros publicados llegan hasta diciembre del 2020 y de caudal hasta junio del 2020.

Metodología

Información topográfica

Se construyó un perfil longitudinal y dos perfiles transversales, quedando dividida la subcuenca en tercios. Se calculó el perímetro (P), expresado en km, que es la medición de la línea envolvente de la cuenca hidrográfica, por la divisoria de aguas; el área de drenaje (A), definida como la superficie encerrada por la divisoria de aguas, en km²; el ancho promedio (Ap), determinado por la relación entre la superficie de la cuenca con su longitud axial expresada en km; la longitud axial (La), que es la distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca (km) y el coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc), que relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo teórico de área equivalente a la cuenca ($Kc = P / \sqrt{A}$) (adimensional). A partir del ancho promedio y la longitud axial, se calculó el factor de forma (IF) (adimensional) que indica cómo se regula la concentración del escurrimiento superficial y manifiesta la tendencia de la cuenca hacia las crecidas. También, se calculó la razón de elongación (Re), mediante la fórmula $Re = (1,129 \times A^{0,5}) / L$. Re es la relación entre el diámetro de un círculo con igual área (A) que la de la cuenca y la longitud máxima de la misma (L). Para cuantificar el efecto del relieve sobre la dinámica hídrica se determinaron las cotas máximas y mínimas y también las alturas en la naciente y la desembocadura. También, se calculó la pendiente media de la cuenca (Pm) que da un indicio del poder erosivo, y considera el área total, la equidistancia entre curvas medidas en Km (Eq) y la longitud de las curvas de nivel en Km (Lc). También, se calcularon distintos índices a partir de parámetros primarios (como la pendiente, la orientación y las curvaturas) y secundarios (como la rugosidad del terreno y el índice topográfico de humedad), para obtener un detalle más preciso de las geometrías de las formas superficiales.

Información hidrometeorológica

Se calculó el mapa de cobertura total de nieve mediante el uso del índice espectral de nieve de diferencia normalizado NDSI (Normalized Difference Snow) para todas las fechas, considerando la presencia de nieve a partir del umbral 0,4 (Salomonson y Appel 2004). Luego, se binarizaron los datos a partir de este umbral, y se calculó la

superficie total cubierta de nieve (en Km²) agregando esta información como nuevo parámetro a los metadatos de cada imagen. De manera complementaria, se exportaron los datos en formato .csv para realizar el análisis en profundidad de toda la serie.

Mediante imágenes radar SAR de distintos períodos es posible estimar la nieve en estado de fusión o comúnmente denominada nieve húmeda, siendo aquella que aparece en la primavera cuando comienza un paulatino aumento de las temperaturas que permite la fusión y por tanto la presencia de agua líquida mezclada con la nieve. La estimación de la nieve húmeda se realiza mediante un tipo de técnica de procesamiento denominada detección de cambios (Nagler y Rott, 2000; Nagler y Rott, 2004; Nagler et al., 2016), la cual se basa en el cambio estacional significativo que presenta la magnitud física que mide el radar (coeficiente de retrodispersión σ), a lo largo de las estaciones del año. También, mediante el uso de imágenes radar SAR se exploró la potencialidad de las técnicas interferométricas para estimar el Equivalente en Agua de Nieve (EAN) y estudiar su variación estacional. El EAN hace referencia a la cantidad de agua líquida que se obtendría si se fusiona el paquete de nieve. Constituye un parámetro muy importante para la hidrología de montaña. En este caso se utilizaron imágenes radar en banda L del satélite SAR argentino SAOCOM. Los datos radar nos brindan, a parte de la información de amplitud de la onda retrodispersada, también la de fase. A partir del cálculo de la diferencia de fase interferométrica entre dos imágenes de dos fechas distintas (cercanas entre sí), es posible analizar los cambios en la distancia entre la superficie observada y el sensor (antena radar montada sobre la plataforma satelital). Este cambio en la distancia entre el sensor y la superficie se traduce en información sobre el espesor de la capa de nieve. A su vez, teniendo información sobre la densidad de la nieve es posible estimar el EAN. En las cuencas áridas y semi-áridas de la cordillera, esta metodología se encuentra aún en etapa de desarrollo y validación, en diversas cuencas piloto, para identificar los alcances y limitaciones del método, y luego contar con mapas que brinden información del EAN a escala cuenca. Para alcanzar este objetivo se programaron adquisiciones SAOCOM en modo de adquisición StripMap, nivel de

procesamiento L1A, polarización HH/VH, beam S4, que cubre la cuenca de estudio. Para la estimación del EAN, como primera prueba de la metodología sobre la cuenca, se seleccionaron tres imágenes de la zona de Valle Hermoso. Con esas imágenes se conformaron dos pares interferométricos y se procesaron siguiendo el procedimiento básico para la obtención de interferogramas diferenciales (DinSAR). Luego, a los interferogramas resultantes se les aplicó la fórmula de relación lineal entre la diferencia de fase y la diferencia del EAN entre ambas fechas del par.

Resultados y discusión

Características morfométricas

La cuenca de Valle Hermoso tiene un área total de 624,5 Km². Entre su nacimiento y desembocadura tiene una distancia de 42 Km, y predomina la orientación norte-sur de sus cauces. En la cabecera de la cuenca, la altura está sobre los 4.000 msnm. mientras que, en la parte inferior, a la altura de la desembocadura del cauce principal, la altura promedio es de alrededor de 2.200 msnm. Del análisis morfométrico se establece que la cuenca presenta una forma oblonga a rectangular oblonga, que presupone que es poco susceptible a las crecidas, cuyas aguas escurren en general por un solo curso principal. El resto de los indicadores apuntan a características similares. Por ejemplo, el Índice de Compacidad que es superior a 1 (valor de 1,6) indica que la forma de la cuenca es más alargada y por tanto el tiempo de concentración será mayor, por lo que es de esperar que la magnitud de la escorrentía generada por una precipitación en ella sea menor que en aquella que presente un menor coeficiente de compacidad. Se calcularon los siguientes parámetros primarios, que se derivan directamente del procesamiento del mosaico MDE-Ar construido, sin necesidad de cálculos adicionales: la altura general del área (Figura 3A) con la mayoría de valores entre 2.088 y 4.000 m.s.n.m., la pendiente general (Figura 3B) que define el grado de orientación del terreno y la orientación de laderas (Figura 3C), que es el ángulo existente entre el vector que señala el Norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector gradiente. Este parámetro resulta de interés para tener una aproximación a las laderas de solana y umbría, aspecto que es determinante para la permanencia de la nieve, ya que las laderas con orientación al sur, en el hemisferio sur, están expuestas

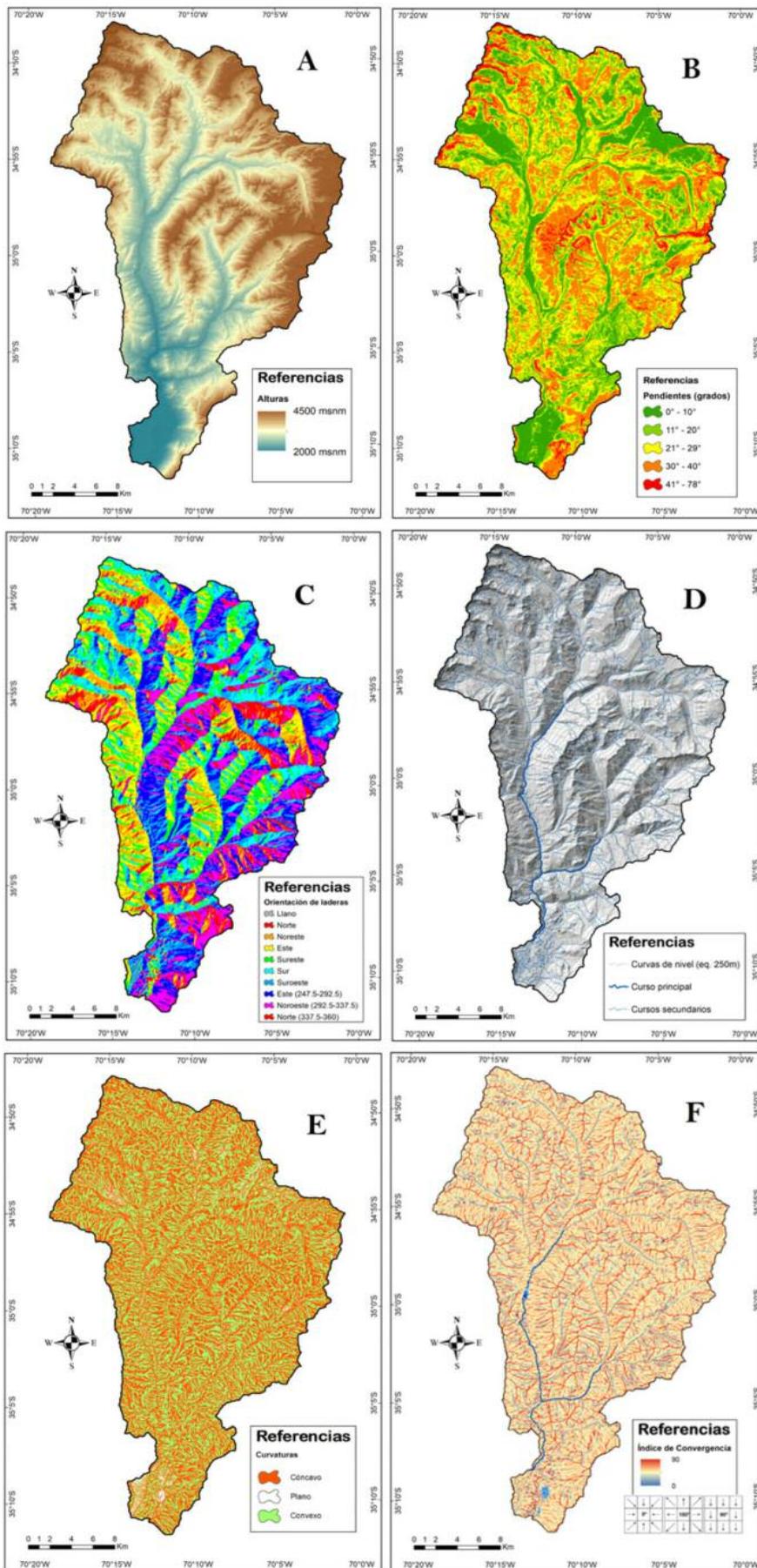
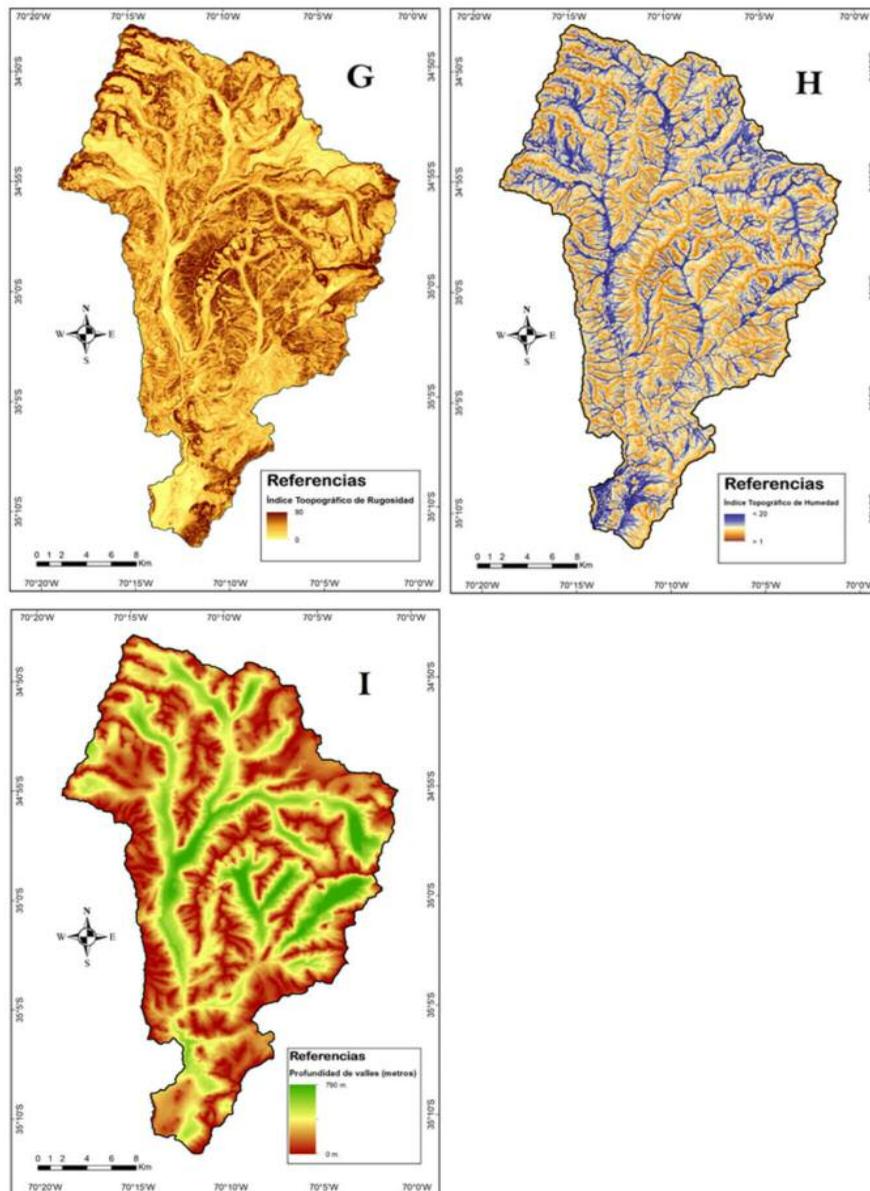


Figura 3. Parámetros geomorfométricos de la sub-cuenca Valle Hermoso: A) Alturas B) Pendientes C) Orientación de laderas, D) Red de drenaje, E) Curvaturas, F) Índice de Convergencia, G) Índice Topográfico de Rugosidad, H) Índice Topográfico de humedad, I) Profundidad de valles.



a menor radiación solar. Las pendientes dominantes en el área están entre 20 y 55 y en la orientación de laderas dominan el cuadrante sur, sureste y este. Se pudo obtener además la red con los drenajes de distinto orden y las curvas de nivel, que dan una primera aproximación al diseño de drenaje en relación con el relieve (Figura 3D).

También, se calcularon parámetros secundarios, que derivan del procesamiento de parámetros primarios, como las curvaturas (Figura 3E), medidas geométricas basada en la derivada de segundo orden. Particularmente la curvatura del plano o contorno permite caracterizar la convergencia y divergencia topográfica, lo que a su vez tiene relación con la acumulación, las tasas de

velocidad de los flujos y el transporte de sedimentos. A partir de estas, se calcula el índice de convergencia (Figura 3F). Para el área piloto se encontró una distribución similar entre concavidad y convexidad. Por último, se computaron el Índice de Rugosidad del Terreno (Figura 3G) que expresa la diferencia de elevación entre celdas adyacentes dentro de un MDE (Riley et al., 1999), el Índice Topográfico de Humedad (TWI) (Figura 3H) que permite identificar zonas donde es posible encontrar acumulación de agua de acuerdo a las condiciones de la pendiente, y el mapa de profundidad de valles (Figura 3I), que indica la distancia vertical a la red de canales.

Cobertura total de nieve

El área promedio cubierta por nieve durante los 22 años de análisis fue de 353 Km², que equivale al 56,5 % de la superficie de la subcuenca Valle Hermoso. El porcentaje promedio de cobertura de nieve en invierno fue de 599 Km² y de 62,9 Km² en verano, debido a que la precipitación en la Cordillera es sumamente escasa en esta estación del año. La superficie máxima cubierta por nieve fue de 619,7 Km² (99,2 % de la superficie), y la mínima de 0,5 Km². Los resultados encontrados en este trabajo reafirman la presencia de una marcada variabilidad interanual, que ya ha sido indicada previamente por otros autores para el área.

En GEE se calculó el NDSI para 348 imágenes de las colecciones Landsat 5 y Landsat 8 que cubren el período 2000-2021 y 5 imágenes Landsat 9 para el año 2022. Como es de esperar, los meses de mayor acumulación de nieve son los de invierno, destacando mayo, junio y julio con mayor superficie de toda la cuenca ocupada por nieve. La Figura 4 muestra la nieve total caída el 9/6/2022, que cubre una superficie de 452 Km². Por citar otro ejemplo, y de acuerdo a la estadística obtenida del procesamiento Landsat 9, la superficie total cubierta de nieve pasa de 450 Km² en mayo a 245 Km² a finales de octubre.

Cobertura de nieve húmeda o próxima a fusión

Se procesaron 326 en pasada descendente,

que cubren el área, y se analizó toda la serie temporal desde 2015 hasta 2021, comparando las etapas de fusión con imágenes de referencia particulares para cada año. El análisis de las series de imágenes muestra un aumento paulatino de la superficie de nieve húmeda a medida que avanza la temporada de primavera, llegando a valores máximos para el mes de noviembre (pico de fusión). Luego hay una caída abrupta de la superficie de nieve húmeda y total conforme se avanza hacia el verano, quedando solamente hielo en cumbres. El análisis topográfico de la nieve húmeda permite corroborar que la fusión comienza en las cotas inferiores, particularmente en zonas de los valles, y se va desplazando hacia cotas superiores y zonas de laderas ya entrado el periodo de deshielo (octubre-noviembre). Para todas las escenas procesadas, con la información de ángulos de incidencia, se enmascaran las zonas alcanzadas por las distorsiones geométricas típicas de la adquisición lateral SAR (sombras, inversión o acortamiento del relieve). Ejemplos de mapas de superficie con nieve de fusión para el año 2015 se muestran en la Figura 5.

Equivalente en agua de nieve

En la Figura 6 se muestra el mapa obtenido aplicando la metodología DinSAR, descrita anteriormente, donde el valor que cada píxel muestra es la variación del EAN entre las fechas del par interferométrico analizado, entre el 25 de junio y el 3 de julio de 2022. Las zonas sin información

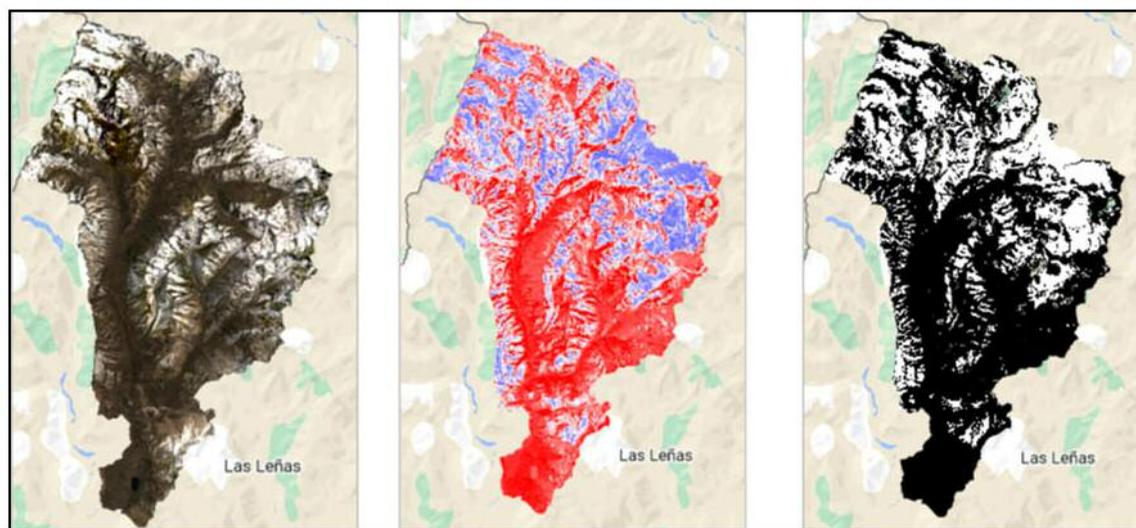


Figura 4. Izquierda: Imagen Landsat 9 del 9/6/2022 color real. Centro: NDSI centrado en 0,4 (azul y blanco: nieve; rojo: otras superficies). Derecha: máscara binaria con NDSI mayor a 0,4 (Blanco: nieve; negro: otras superficies).

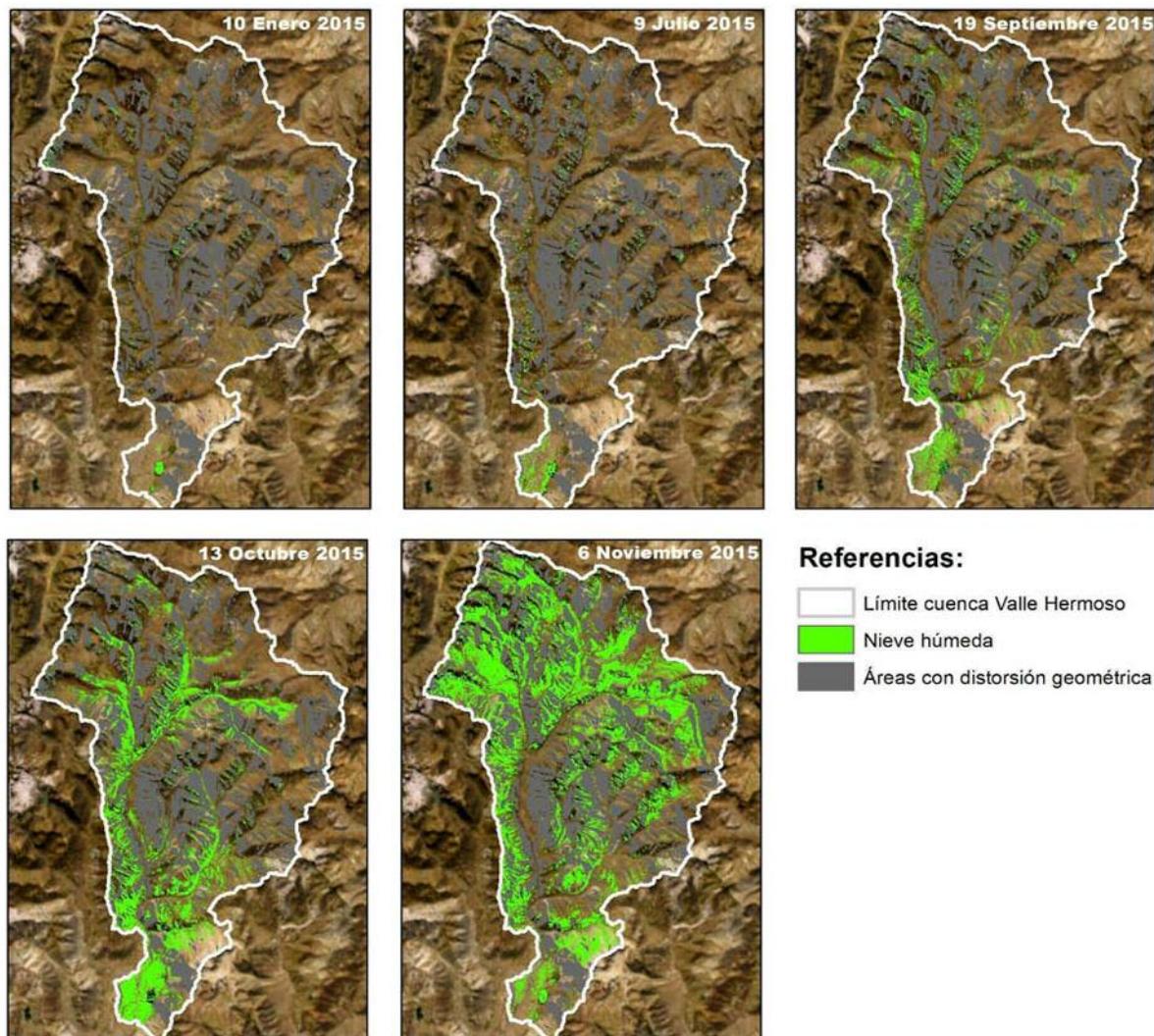


Figura 5. Mapas de nieve húmeda en base a imágenes Sentinel 1 pasada descendente año 2015. En las zonas con distorsiones geométricas no es posible registrar datos de nieve húmeda.

corresponden a zonas de baja coherencia interferométrica (menor a 0,3), las cuales fueron enmascaradas debido a que no es información confiable. En la figura puede observarse, además, que la mayor variación de EAN (color rojo) se da en las zonas altas de la cuenca de estudio, con EAN mayores a 100 mm.

Si bien la técnica presenta ciertas limitaciones, como por ejemplo la pérdida de coherencia interferométrica debido a nevadas cercanas a la fecha de adquisición de las imágenes, constituye un gran avance en lo que refiere a estudios de parámetros de nieve con sensores SAR. La posibilidad de contar con la información areal de EAN obtenido de manera remota sobre la cuenca resulta de gran importancia para los estudios hidrológicos en las zonas de montaña, con la posibilidad de

vincularlo al caudal de la cuenca y obtener información sobre el volumen de agua disponible.

Conclusiones y lineamientos futuros

En este trabajo se presentan los principales resultados alcanzados hasta el momento en el marco del convenio interinstitucional INTA-INA-CONAE en la cuenca alta del río Colorado: fuentes de información satelital, metodologías y los primeros resultados para el diseño de un sistema de seguimiento de variables hidrometeorológicas (cobertura de nieve total, nieve húmeda, EAN) complementada con datos de estaciones hidrológicas (EAN y caudal) y de terreno (MDE). Se determinó cobertura de nieve total a partir de sensores ópticos y nieve húmeda con datos SAR, y se presentó una metodología para el monitoreo

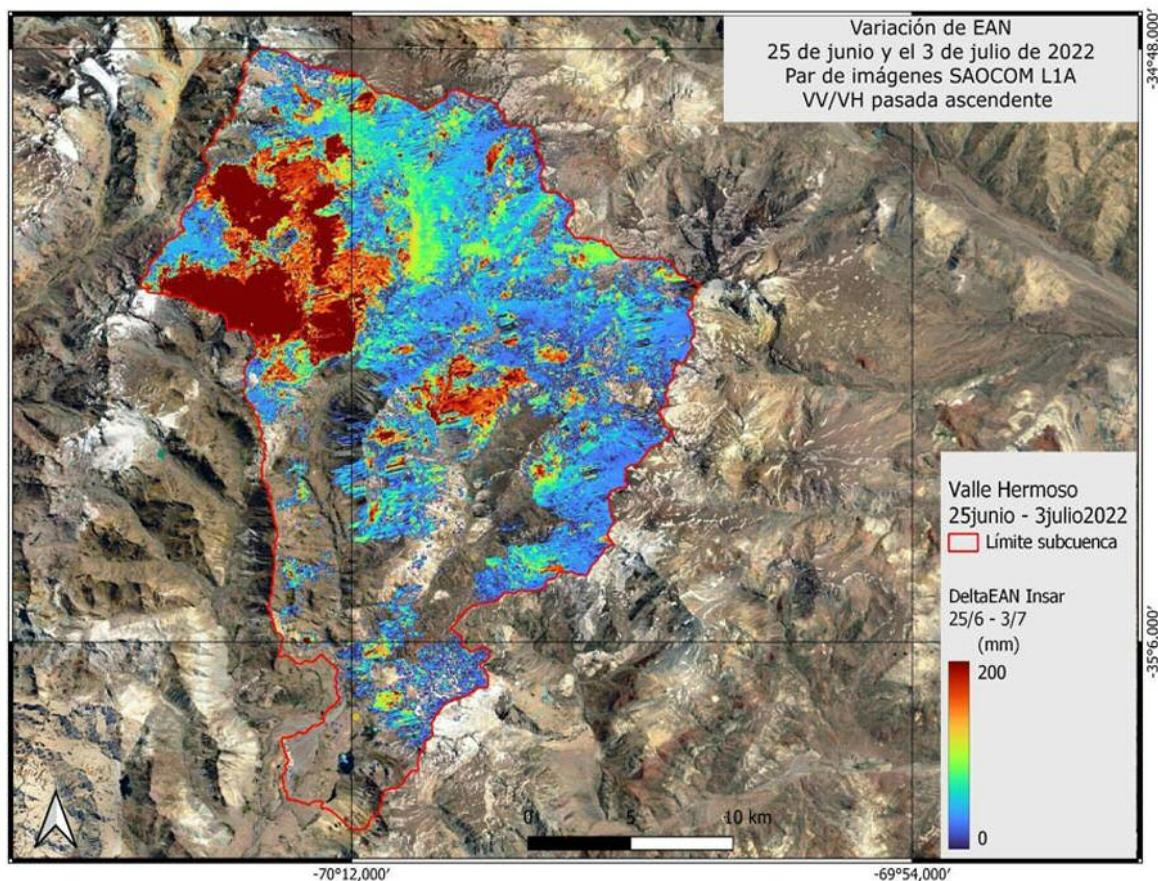


Figura 6. Variación del EAN estimada con datos SAOCOM, entre el 25 de junio y el 3 de julio de 2022.

de cobertura de nieve, avanzando en la estimación del EAN desde sensores remotos. Se han probado metodologías tendientes a generar información distribuida en el espacio de las condiciones de la nieve, que dan apoyo a los datos puntuales de estaciones de medición en alta montaña y ayuden a la toma de decisiones y a la gestión del recurso aguas abajo en un contexto crítico de escasez hídrica. Además, se utilizan datos satelitales de radar SAR y su correlación con datos medidos de estaciones en alta montaña permitiendo un seguimiento espacio-temporal de las condiciones del manto nival con distintas fuentes de información. Las dos metodologías utilizadas permiten conocer los rasgos y comportamiento de la cuenca en su periodo de fusión nival, otorgando datos tales como el inicio de la misma, la superficie de nieve próxima a fusión y las cotas de ubicación. En este análisis integrado de información, se destaca el uso de grandes volúmenes de datos en la plataforma Google Earth Engine, para el periodo 2000-2022. Poder reconstruir los escenarios de las con-

diciones nivológicas a partir de series multitemporales, es un aporte novedoso para el estudio de esta cuenca andina. Como líneas de investigación para el año 2023 se destacan: 1) el procesamiento de toda la información para las cuencas completas Grande y Barrancas y su validación con los datos de estaciones hidrológicas, además de poder relacionar los resultados obtenidos en este trabajo con datos de temperatura de superficie, de estaciones meteorológicas e información satelital, precipitación y otras variables hidrometeorológicas que permitan determinar la influencia estacional y las variaciones interanuales de la cobertura de nieve. 2) Se están investigando proyecciones de escenarios de cambio climático y su incidencia sobre la temperatura y precipitación, la modelación hidrológica para la predicción de caudal en la cuenca alta del río Colorado, y analizar la relación oferta-demanda del agua considerando la disponibilidad del recurso en la alta cuenca, que depende de la precipitación hidro-nival, y la demanda por parte de los usuarios del agua en la

cuenca baja para los distintos usos.

La acentuada sequía que afronta la región sumada a los escenarios futuros de cambio climático que indican déficit de precipitación para los próximos años, y disminución de los caudales, hacen necesario un replanteo en la distribución y manejo del agua, como medidas de adaptación a este nuevo contexto. A partir de los resultados alcanzados y las líneas de investigación-extensión futuras que quedan pendientes, se destaca también la continuidad de los convenios de cooperación interinstitucionales para fortalecer vínculos y aportar capacidades a demandas territoriales concretas.

Bibliografía

- Aumassanne, C. M., Beget, M. E., Oricchio, P., Di Bella, C. M. y Gaspari, F. (2019). Cobertura de nieve en las subcuencas de los Ríos Grande y Barrancas (Argentina) y su relación con la morfometría. *RIA*, 45 (3): 394 - 403.
- Aumassanne, C. M., Beget, M. E., Oricchio, P., Di Bella, C. M., Gaspari, F. J., Babinec, F. J. (2022). Dinámica anual e interanual de la cobertura de nieve en la cuenca alta del río Colorado (Argentina) y su relación con el caudal. *Meteorológica* 47 (2).
- Aumassanne, C. M., Di Bella, C. M. (2015). "Seguimiento Satelital de La Cobertura de Nieve En La Cuenca Alta Del Río." en el XXV Congreso Nacional del Agua.
- Cara, L., Masiokas, M., Viale, M., y Villalba, R. (2016). "Análisis de la cobertura nival de la cuenca superior del río Mendoza a partir de imágenes MODIS." *Meteorológica*, 21-36.
- Cogliati, M. G., D. A. Y. Groch, y F. G. Finessi. (2015). "Utilización de productos Terra-Modis para el cálculo de la superficie nival en la cordillera del Viento (Neuquén, Argentina)." VIII Congreso Argentino de Tecnología Espacial, Buenos Aires, Argentina.
- COIRCO (Comité Interjurisdiccional del Río Colorado). Perl, J. E., Andrés, F. O. (2015). Presentación: Manejo integral de la cuenca del río Colorado. Oferta y demanda hídrica en periodos de sequía. En: Jornada de Actualización "Cuenca del río Colorado: Situación Actual, Proyectos en Ejecución, Planificación". Villa Casa de Piedra, La Pampa. Disponible en: www.coirco.com.ar
- COIRCO (Comité Interjurisdiccional del Río Colorado). (2013). Programa Integral de Calidad de Aguas Del Río Colorado – Calidad Del Medio Acuático. Informe Técnico. Comité
- Interjurisdiccional del Río Colorado, Secretaría de Energía de la Nación, Grupo
- Interempresario. Disponible en: www.coirco.com.ar
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Duncan C., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 Megadrought in Central Chile: Impacts on Regional Hydroclimate and Vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences* 21(12):6307-27.
- Guneriusson, Tore, Kjell A. Hogda, Harald Johnsen, and Inge Lauknes. (2001). InSAR for Estimation of Changes in Snow Water Equivalent of Dry Snow. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- Nagler, T., Helmut, R. (2000). Retrieval of Wet Snow by Means of Multitemporal SAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38 (2 1):754-65.
- Nagler, T., Helmut, R. (2004). Snow Classification Algorithm for Envisat Asar. *Proc of the Envisat & ERS Symposium Proceeding. IGARSS 98*.
- Nagler, T., Helmut R., Ripper, E., Bippus, G., Hetzenecker, M. (2016). Advancements for Snowmelt Monitoring by Means of Sentinel-1 SAR. *Remote Sensing*.
- Rivera, J. A., Marianetti, G., Scaglione, M. (2022). Análisis de Los Eventos de Precipitación Que Afectan La Distribución de Agua Potable En El Gran Mendoza, Argentina. *Cuadernos Geográficos* 61(2):204-22.
- Salcedo, A. P., Cogliati, M. G. (2014). Snow Cover Area Estimation Using Radar and Optical Satellite Information. *Atmospheric and Climate Sciences* 04(04):514-23.
- Salomonson, V. V., Appel, I. (2004). Estimating Fractional Snow Cover from MODIS Using the Normalized Difference Snow Index. *Remote Sensing of Environment* 89(3):351-60.
- Solorza, R., Cogliati, M. G, Salcedo, A. P., Notarnicola, C. (2016). Estimación del área cubierta de nieve con datos SAR en banda L en un sector cordillerano de la patagonia argentina. *Revista de La Asociación Geológica Argentina* 73:421-29.
- Teverovsky, S. A., Pascual, I. G., Notarnicola, C., Salinas De Salmuni, G. (2018). Estimation of Wet Snow Cover Area with SAR Imagery in the Basin of Tupungato River. *IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)* 1-6.

Primeros aportes en la predicción de propiedades edáficas usando imágenes satelitales

First contributions in the prediction of edaphic properties using satellite images

Castiglioni Mario G.¹; Espindola Aime²; Gusmerotti Lucas²; Havrylenko Sofia B.²; Spinazzola Emilio¹

¹ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos

² Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Clima y Agua

³ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Suelos

Resumen

El análisis de imágenes multiespectrales derivadas de diferentes sensores remotos facilita en gran medida el monitoreo de los sistemas productivos agrícolas. La evaluación de diversos indicadores derivados de ellas, permite observar daños y situaciones que pueden afectar el desarrollo de los cultivos. El uso intensificado del suelo durante el año, es una práctica cada vez más utilizada ya que favorece el nivel de materia orgánica del suelo y contribuye a mejorar sus propiedades físico-químicas. El objetivo del presente trabajo fue evaluar, a partir del uso de imágenes satelitales, la incidencia que tiene sobre distintas propiedades edáficas la proporción de tiempo que el suelo es ocupado con cultivos en desarrollo. La aplicación de esta metodología permitió predecir el comportamiento de distintos atributos de calidad del suelo. Dada la mayor resolución espacial brindada por las imágenes Landsat, la proporción de tiempo ocupada por cultivos en desarrollo, estimada mediante el uso de dicho sensor, se vinculó de manera más ajustada con aquellas propiedades ligadas al carbono lábil y a la calidad de la estructura.

Palabras clave

Imágenes multiespectrales, atributos edáficos, efecto de los cultivos.

Introducción

La ausencia de cultivos durante ciertos períodos del año resulta en un menor uso de recursos como el agua y la radiación solar, los cuales no son aprovechados para la producción de granos y biomasa vegetal (Andrade et al., 2017). A su vez, la mayor frecuencia en el número de cultivos por

año favorece el mantenimiento de una elevada actividad microbiana, a través de la cual se generan diferentes sustancias cementantes que proporcionan una mayor estabilidad en la estructura del suelo y un incremento en el almacenaje del carbono orgánico edáfico (Six et al., 2006). Contrariamente, cuando la producción agrícola es menos intensificada y menos diversa, declina la calidad edáfica aún bajo sistemas de labranza con poca o ninguna remoción del suelo (Sasal et al., 2017). El Índice de Intensificación en la Secuencia de Cultivos (ISI), que resulta de la relación entre el número de meses en que los cultivos en desarrollo ocupan el suelo respecto al número total de meses de los años considerados, ha demostrado ser un parámetro que se vincula significativamente con el comportamiento de algunas propiedades edáficas (Sasal, 2012), debido a la influencia favorable que tienen las raíces en crecimiento sobre la biología del suelo. No obstante, su determinación se ve limitada cuando no se dispone de información histórica sobre la sucesión de cultivos implementada en un determinado sitio.

Por su parte, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es un estimador lineal de la fracción de la radiación solar fotosintéticamente activa que es absorbida por la vegetación, la cual constituye la principal fuente de carbono para las plantas (Sellers et al., 1992). De esta manera, la estimación de este índice a partir de la obtención de imágenes satelitales de manera frecuente y regular a lo largo de varios años, permitiría inferir el período de tiempo que los cultivos y/o pasturas en desarrollo ocupan un determinado sitio. También, al contar con un registro histórico de dichas imágenes, se podría evaluar cuál es la ventana temporal

en una secuencia de cultivos y/o cultivos y pasturas, que influye sobre el comportamiento de determinadas propiedades edáficas.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar en lotes de productores agropecuarios ubicados en una microcuenca localizada en el partido de Rojas (provincia de Buenos Aires), la incidencia que tiene sobre distintas propiedades edáficas, la proporción del tiempo que es ocupado con cultivos en desarrollo, estimada a partir de imágenes satelitales.

Materiales y métodos

El área de estudio corresponde una microcuenca de 1495 ha, que se extiende entre los 34° 19' y 34° 14' S y 60° 42' y 60° 37' O, ubicada a 7 km al sureste de la localidad de Rojas, Provincia de Buenos Aires (Figura 1). La serie de suelos dominante es Rojas, clasificada como un Argiudol típico con textura limosa (arcilla: 22,9 %; arena: 27,7 %; limo: 49,4 %) (INTA, 1974). En los últimos 30 años, la actividad predominante dentro de la microcuenca ha sido la agricultura continúa, teniendo mayor relevancia la producción de cultivos de verano (soja y maíz) bajo siembra directa. No obstante, existen lotes bajo producción ganadera, ubicados en los sectores lindantes al curso de agua.

Dentro de dicha área, en agosto de 2019 se

obtuvieron 25 muestras de suelo superficial (0 a 10 cm), correspondientes a distintos lotes de productores (Espindola et al., 2020). Sobre cada una se determinó: pH (Page et al., 1982), densidad aparente (Dap) (método del cilindro) (Hao et al., 2008), carbono orgánico total (COT) (método de Walkley y Black) (Page et al., 1982) y particulado (COP) (Cambardella et al., 1992), estabilidad estructural (humedecimiento rápido (HR), lento (HL), disgregación mecánica (DM) y su promedio (ME) (Le Bissonais, 1996) y el contenido de agua a capacidad de campo (CC) y en el punto de marchitez permanente (PMP) (Klute, 1986).

Asimismo, para los 25 lotes se estimó mediante dos métodos distintos, la proporción de meses ocupados con cultivos o pasturas en desarrollo, respecto al total de meses correspondientes a distintas ventanas temporales previas al muestreo de suelos (ISI). Con el primer método, dicha relación fue cuantificada a partir de la identificación de los cultivos y/o pasturas que ocuparon los lotes durante el período 2007-2019. Para cumplir con dicho propósito, se realizó una clasificación supervisada (CS) del uso del suelo para las cuatro estaciones climáticas del año, extrayendo el valor de píxel clasificado que coincidía espacialmente con el sitio muestreado a campo. Se utilizó el algoritmo Random Forest de la herramienta de procesa-

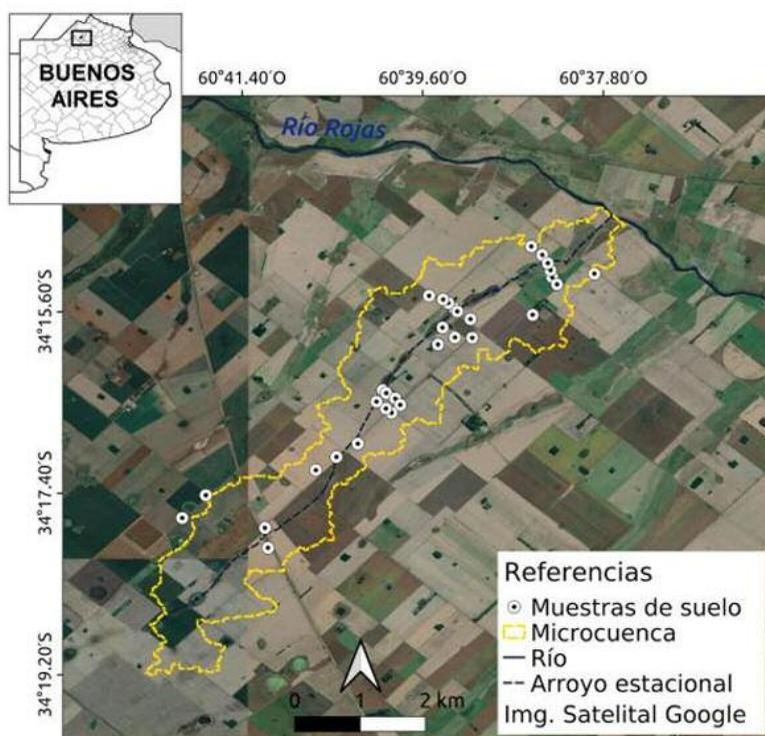


Figura 1. Área de estudio en el Partido de Rojas, Buenos Aires.

Tabla 1. Coeficientes de correlación entre las distintas variables edáficas superficiales y las distintas formas de cuantificar el ISI.

Variabes edáficas	CS	Landsat 513	MODIS 45
Dap	ns	-0,48*	-0,58*
pH	0,85**	0,88**	0,70**
CO	0,74**	0,74**	0,60**
COP	0,85**	0,89**	0,76**
CC	0,67**	0,63**	0,72**
PMP	0,44*	0,46*	0,70**
HR	0,79**	0,94**	0,81**
HL	0,66**	0,68**	0,49*
DM	0,57**	0,46*	ns
ME	0,82**	0,85**	0,66**
Landsat513	0,81**	1	0,83**
MODIS45	0,70**	0,83**	1

Dap: densidad aparente; CO: carbono orgánico total; COP: carbono orgánico particulado; CC: contenido de agua a capacidad de campo; PMP: contenido de agua en el punto de marchitez permanente; HR: humedecimiento rápido; HL: humedecimiento lento; DM: disgregación mecánica; ME: estabilidad estructural promedio; CS: ISI calculado a partir de la identificación de cultivos y/o pasturas mediante una clasificación supervisada; Landsat513: ISI calculado con imágenes Landsat de los 13 años previos al muestreo y valor NDVI umbral de 0,5; MODIS45: ISI calculado con imágenes MODIS de los 5 años previos al muestreo y valor NDVI umbral de 0,4. Ns: no significativo; *($p < 0,05$); **($p < 0,01$).

miento en la nube Google Earth Engine (GEE) sobre imágenes Landsat 5 y 8 (Espindola et al., 2020).

En el segundo método propuesto para la estimación del ISI, se obtuvieron los valores de NDVI de los sitios de muestreo para cada paso del satélite, empleando también GEE y su catálogo de imágenes Landsat 5 y 8 (Surface Reflectance Tier 1) para el período 2007 a 2019. A partir de los valores de la banda pixel_qa se eliminaron aquellas fechas que presentaban nubes o sombra de nubes. Además, para explorar esta metodología con imágenes de diferente resolución espacial y temporal, se utilizaron también datos de NDVI de la versión 6.1 de los productos MOD13Q1 y MYD13Q1 del sensor Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) de

las plataformas Terra y Aqua, respectivamente, para el período 2001 a 2019. Para el desarrollo de esta metodología se tuvieron en cuenta tres valores umbral de NDVI (0,3; 0,4 y 0,5) que permitieron cuantificar el número total de visitas de cada satélite en los que se consideró efectiva la incidencia de los cultivos y/o pasturas sobre las propiedades del suelo. De esta manera, se estimó que, en los períodos del año con valores iguales o inferiores a dichos umbrales, no habría efectos de la vegetación sobre las distintas variables edáficas, ya que a partir del análisis de las imágenes se corroboró que estos valores de NDVI correspondían a etapas sin cultivo y/o con malezas. Al mismo tiempo, se consideraron distintos períodos de tiempo de análisis: con las imágenes MODIS se contemplaron los 18, 10 y 5 años previos al muestreo de suelo, mientras que para las Landsat se tuvieron en cuenta los 13 y 5 años previos. Para estudiar el grado de vinculación entre las propiedades edáficas con las tres formas de cálculo del ISI propuestas, se hicieron análisis de correlación y regresión lineal simple (Di Rienzo et al., 2009).

Resultados y discusión

En la Tabla 1 se observan los coeficientes de correlación mayores y más significativos, obtenidos entre las distintas propiedades edáficas con el ISI, cuantificado este último parámetro mediante el uso de imágenes Landsat (Landsat513), MODIS (MODIS45) y por la identificación de los cultivos y/o pasturas presentes en los distintos lotes al usar una clasificación supervisada (CS). Como se observa en la misma, la mayoría de los atributos del suelo analizados se vinculan significativamente con las distintas formas de cuantificar la proporción del tiempo ocupada por los cultivos en desarrollo. Con el uso de las imágenes Landsat, estos coeficientes fueron superiores cuando se consideró un período previo al muestreo de suelos de 13 años y al utilizar un valor umbral de NDVI de 0,5 (Landsat513), mientras que con las provistas por MODIS los mejores coeficientes de correlación surgieron con un intervalo de tiempo previo de 5 años y un valor umbral de NDVI de 0,4 (MODIS45). Los resultados del análisis de correlación utilizando otras combinaciones de tiempo previo y valores de NDVI umbral, también fueron significativos pero menores a los detallados en la Tabla 1.

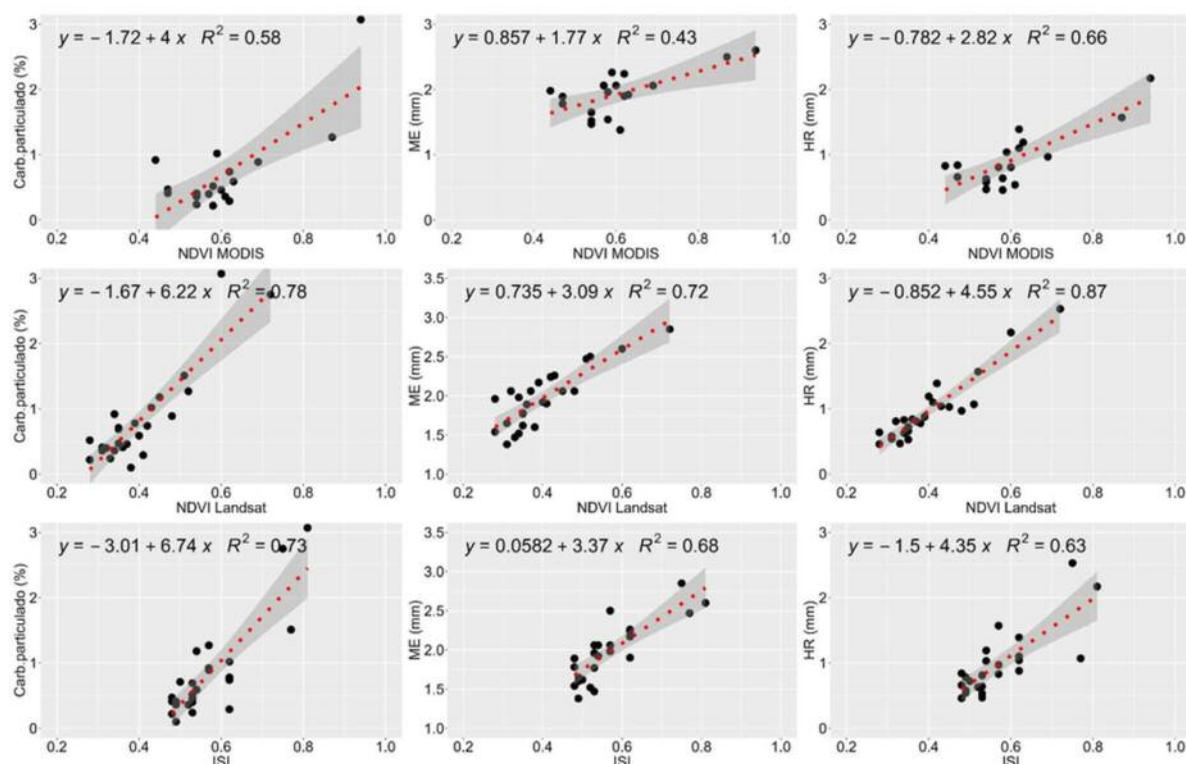


Figura 2. Gráficos de dispersión con sus respectivas medidas de ajuste ($p < 0,05$) del contenido de carbono orgánico particulado, diámetro medio ponderado de agregados estables promedio (ME) y el correspondiente al pretratamiento de humedecimiento rápido (HR), respecto al ISI estimado de acuerdo con: a) imágenes MODIS de los 5 años previos al muestreo y valor NDVI umbral de 0,4 (MODIS45); b) al calculado con imágenes Landsat de los 13 años previos al muestreo, con valor NDVI umbral de 0,5 (Landsat513) y c) mediante la identificación de los cultivos presentes por medio de una clasificación supervisada (CS).

El ISI surgido con las imágenes Landsat se vinculó mejor con aquellas propiedades como el pH, las ligadas al carbono y a la estabilidad estructural del suelo, respecto a lo ocurrido con el ISI obtenido a partir de CS o con el resultante del uso de las imágenes MODIS. Este mejor comportamiento en los coeficientes de correlación, se debería a la mayor resolución espacial de las imágenes Landsat con respecto a las aportadas por MODIS. Sin embargo, el ISI surgido de las imágenes provistas por este último sensor, presentaron los mejores coeficientes de correlación con aquellas variables asociadas a la porosidad (Dap) y distribución de poros (CC y PMP). A su vez, el grado de asociación logrado entre las distintas propiedades edáficas y el ISI surgido de CS, fue en general intermedio o menor que en los restantes casos.

La Figura 2 muestra los gráficos de dispersión en los cuales se puede observar el ajuste significativo entre el ISI generado por los distintos proce-

dimientos y algunas variables del suelo como el COP y la estabilidad estructural (ME y HR). En todos los casos, mejoró el coeficiente de determinación (R²) cuando se utilizaron imágenes del satélite Landsat en lugar de MODIS.

Conclusiones

El período de ocupación de los cultivos en desarrollo, cuantificado a partir del análisis de imágenes multiespectrales, resultó ser una metodología útil para poder predecir el comportamiento de algunos atributos de calidad del suelo. No obstante, quedan aspectos por investigar con mayor profundidad, dado que no hubo coincidencias entre los resultados surgidos de la utilización de las imágenes provistas por Landsat y MODIS, tanto en el intervalo de tiempo previo al análisis de suelo que más influiría sobre dichos atributos edáficos, como en el valor de NDVI umbral más recomendable para ser utilizado. De cualquier manera,

teniendo en cuenta la mayor rapidez y sencillez que resulta de utilizar directamente el valor de NDVI para definir la proporción de tiempo ocupado por cultivos en desarrollo, hacen que esta última sea una alternativa preferible a la de identificar a los cultivos presentes.

Bibliografía

- Andrade, J.F., Poggio, S.L., Ermácora, M., y Satorre, E.H. (2017). Land use intensification in the Rolling Pampa, Argentina: Diversifying crop sequences to increase yields and resource use. *European Journal of Agronomy*, 82, 1-10.
- Cambardella, C.A., y Elliott, E.T. (1992). Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil science society of America journal*, 56(3), 777-783.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Gonzalez, L.A., Tablada, E.M., Díaz, M.P., Robledo, C.W., Balzarini, M.G. (2009). *Estadística para las ciencias agropecuarias*. 7ma ed. 372 pp.
- Espindola, A., Gusmerotti, L.A., Havrylenko, S.B., Laghi, J.D., Lisa, J.C., y Castiglioni, M.G. (2020). Efecto de la intensificación en la secuencia de cultivos sobre algunas propiedades edáficas. En XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Hao, X., Ball, B.C., Culley, J.L.B., Carter, M.R., y Parkin, G.W. (2008). Soil density and porosity. En: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.). *Soil sampling and methods of analysis* (2, 179-196). Canadian Society of Soil Science.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). (1974) Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja 3560-2 (Rojas), 1:50000, Buenos Aires, Argentina.
- Le Bissonnais, Y.L. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of soil science*, 47(4), 425-437.
- Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. En A.Klute (Ed.) *Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical methods* (5, pp. 635-662). Agronomy.
- Page, A.L., Miller, R.H., y Keeney, D.R. (1982). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and Microbiological properties* 2nd ed. American Soc. of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA, 1159.
- Sasal, M.C. (2012). Factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo siembra directa. Efecto sobre el balance de agua [Tesis Doctoral, Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires].
- <http://ri.agro.uba.ar/greenstone3/library/collection/tesis/document/2012sasalmariacarolina>
- Sasal, M.C., Boizard, H., Andriulo, A.E., Wilson, M.G., y Léonard, J. (2017). Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil and Tillage Research*, 173, 33-41.
- Sellers, P.J., Berry, J.A., Collatz, G.J., Field, C.B., y Hall, F.G. (1992). Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote sensing of environment*, 42(3), 187-216.
- Six, J., Frey, S.D., Thiet, R.K., y Batten, K.M. (2006). Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 555-569.

Sistemas de Big Data reusables para el análisis de los recursos hídricos en los valles irrigados de la Norpatagonia

Reusable Big Data Systems for water resource analysis in the irrigated valleys of North Patagonia

Cechich Alejandra¹; Buccella Agustina¹; Montenegro Ayelen²; Muñoz Ángel²; Rodríguez Andrea²

1 Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Informática

2 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Patagonia Norte, EEA Alto Valle

Resumen

El conocimiento de un agrosistema y su respuesta frente a eventos de origen natural y antrópico permite tomar acciones en relación a la gestión del agua a distintas escalas, para un uso eficiente del recurso. Todo esfuerzo dirigido a analizar, estudiar y brindar soluciones es de suma importancia, fundamentalmente en un contexto de emergencia hídrica como en el que se encuentran los valles irrigados de la Norpatagonia. Las nuevas tecnologías para analizar datos y determinar causas, encontrar patrones o predecir resultados, son muy útiles. Big Data es un área de estudio que considera grandes volúmenes de datos, tanto estructurados como no estructurados, mecanismos de ingestión y su procesamiento para centrarse luego en la utilidad y aprovechamiento de estos. La aplicación de Big Data a la agroindustria y particularmente en temas estratégicos, como el uso eficiente de los recursos hídricos bajo una mirada de sustentabilidad, no es un tema nuevo. Se han presentado muchos trabajos de Big Data en este dominio, realizando análisis que permiten explotar la información para clasificar, relacionar y/o predecir nuevos comportamientos o sucesos. En particular, la reciente evolución de la tecnología de Big Data y de analítica avanzada de datos está permitiendo gestionar volúmenes y tipologías de datos hasta hace poco impensables, impactando favorablemente en este sector.

En este contexto y como parte del trabajo conjunto entre el grupo GIISCO (Grupo de Investigación de Ingeniería de Software del Comahue) de la Facultad de Informática de la Universidad Nacional del Comahue y la Estación

Experimental Agropecuaria de Alto Valle de INTA, hemos realizado varios trabajos que se pueden dividir en dos grupos. Por un lado, un grupo se dedica a crear mecanismos que puedan reusarse en diferentes contextos y con diferente información. El segundo grupo se dedica a la realización de experiencias en procesos de Big Data que retroalimentan los trabajos del primero y brindan resultados útiles en la toma de decisiones. Los trabajos del primer tipo derivaron en una Tesis de Licenciatura en Sistemas de Información, se propone una metodología junto con una herramienta de soporte para la registración y reuso de experiencias de Big Data. Las mismas, al ser registradas dentro de un repositorio de datos especial, permiten volver a ser consultadas en nuevas experiencias. Al mismo tiempo, surgió un artículo que fue presentado en el Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2021) dentro del dominio de aguas subterráneas, donde se analizaron las causas e incidencias que producen fluctuaciones en el nivel freático de un acuífero libre para la zona de Villa Regina.

Luego, dentro del segundo grupo, un trabajo realizado derivó en una Tesis de Licenciatura en Sistemas de Información y en un artículo publicado en el Congreso Argentino de AgroInformática (CAI 2022), donde se analizaron los factores que pueden influenciar el análisis de turbidez y/o su predicción, principalmente relacionados a climatología, calidad del agua, cartografía de suelos y uso de los mismos. Por último, podemos citar otro artículo presentado en el CACIC 2022 donde se describió un trabajo preliminar para caracterizar factores hidrológicos y agroclimatológicos que

influyen en el índice de vegetación NDVI e instanciar esas características sobre datos provistos por el INTA. Los análisis realizados mostraron buenas correlaciones entre el índice y algunos de los factores caracterizados.

Se continúa avanzando en el área de Big Data dentro del dominio de la agricultura con especial énfasis en los recursos hídricos superficiales y subterráneos y el uso de información satelital.

Para la EEA Alto Valle la incorporación de técnicas de Big Data orientadas al análisis y modelado de información del medio físico-natural referida a los sistemas productivos, es un soporte para la toma de decisiones y/o asesoramiento tanto a productores como organizaciones y/o instituciones afines a la temática en la región.

Palabras clave

Agricultura, agua, big data, reuso, soporte a la toma de decisiones.

Aplicación del modelo SWAT y técnicas de teledetección para evaluar inundaciones en cuencas pampeanas

Application of the SWAT model and remote sensing techniques to assess flooding in basins of the Pampas region

Havrylenko Sofia¹; Bodoque José M.²; Sabio Milton N.³; Gattinoni Natalia¹

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Clima y Agua

2 Universidad de Castilla-La Mancha

3 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA Pergamino, Agencia de Extensión Rural Lobos

Resumen

La llanura pampeana argentina, región que alterna zonas de muy bajas pendientes con sectores ligeramente ondulados, es un escenario de gran fragilidad frente a eventos hidrometeorológicos extremos. El aumento de la frecuencia de lluvias intensas en cortos períodos de tiempo, en un contexto en el que las cuencas no pueden evacuar grandes volúmenes de agua, ha incrementado el riesgo de inundaciones y de inundaciones persistentes en el tiempo. Las inundaciones tienen severos impactos económicos, sociales y sobre los recursos naturales, produciendo graves pérdidas tanto en la actividad agrícola como en la infraestructura instalada. Estos daños pueden minimizarse mediante la implementación de mejores prácticas de manejo y una adecuada planificación del uso de la tierra. El Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un modelo hidrológico continuo que generalmente no se usa para estudiar eventos de inundación específicos. Sin embargo, los largos periodos de escurrimiento en las cuencas pampeanas, con una curva de recesión mayor a 25 días, limita el uso de los modelos clásicos de simulación de eventos de inundación. El objetivo de este estudio fue analizar la idoneidad del modelo SWAT para representar eventos de inundación en la cuenca del río Arrecifes durante el período 2012-2017. Los resultados con SWAT se combinaron con técnicas de teledetección aplicadas a imágenes de radar Sentinel-1, acostándose a un determinado evento de inundación, con el fin de estimar la afectación espacial resultante. La cali-

bración (NSE 0,78) y la validación (NSE 0,71), en escala de tiempo diaria, indicaron un buen desempeño del modelo. Como resultado se obtuvieron mapas preliminares de las áreas inundadas, los cuales podrían estar asociados a las descargas y tiempo de propagación de la onda de inundación para el evento estudiado. Este enfoque permitió combinar dos técnicas que sentaron las bases para un estudio de riesgo de inundaciones en una cuenca rural y que podrían ser utilizadas como herramienta de planificación para usuarios finales ubicados en la región pampeana.

Palabras clave

Inundación, modelo hidrológico, simulación continua, Sentinel-1.

Calidad altimétrica de un modelo digital de elevación generado con imágenes banda L de SAOCOM

Altimetric quality of a digital elevation model generated with SAOCOM L-band images

Havrylenko Sofia B.¹; Espindola, Aime¹

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Clima y Agua

Resumen

Los modelos digitales de elevación (MDE) son una herramienta útil para determinar el funcionamiento hidrológico de una cuenca. Si bien existe una oferta de MDEs disponibles gratuitamente en la web, los de mayor resolución son escasos en el país o inexistentes para algunas áreas de estudio. Es por ello que el objetivo principal de este trabajo fue evaluar la calidad altimétrica de un MDE generado a partir de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) de banda L de la constelación de satélites de SAOCOM, en un área de 375,5 km² del partido de Rojas localizada en la pampa ondulada bonaerense. Así, se propuso desarrollar un MDE utilizando técnicas de interferometría (InSAR) y evaluar su calidad altimétrica mediante la comparación con el MDE SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), datos topográficos interpolados con el método Kriging (puntos altimétricos y la Red de Nivelación Argentina del Instituto Geográfico Nacional) y datos del terreno tomados con GPS geodésico. Como objetivos secundarios se propusieron generar productos de carácter topográfico e hidrológico a partir del MDE SAOCOM. La metodología consistió en aplicar InSAR en pares de imágenes SAOCOM 1A/1B del 04 y 12 de febrero de 2022 y 12 y 20 de junio de 2022. Luego, se realizó un post-procesamiento para eliminar artefactos y valores espurios, rellenar espacios, ajustarlo a datos locales GNSS medidos en campo y aplicar un filtro de suavizado. Posteriormente, se corrigió el MDE hidrológicamente, aplicando algoritmos para eliminar depresiones, sobreelevaciones y dar dirección al flujo de agua. Para validar el MDE se lo comparó con 13 puntos GNSS, obteniendo una diferencia media global de 0,46 m y un EMC de 1,29 m. Los resultados de la diferencia entre las imágenes

MDE SAOCOM y el SRTM muestran que más del 90 % de los píxeles presentan una variación menor a los 2 m, y los mayores corresponden a lotes con cultivo, zonas de bajos o arboledas, y coinciden con píxeles de baja coherencia. Los perfiles longitudinales de ambos modelos siguen el mismo patrón, y en general no se observaron desplazamientos horizontales, y la mayor diferencia se da en el eje vertical de las alturas. Para evaluar el comportamiento hidrológico del MDE SAOCOM se desarrollaron parámetros básicos que caracterizan las cuencas hidrográficas: red de drenaje, delimitación de cuencas hidrográficas y cálculo de algunas características a nivel de subcuenca. Los escurrimientos se definieron hacia los cursos de agua principales y afluentes, aunque se identificaron sectores con baja pendiente o con depresiones artificiales donde la red de drenaje es errónea. La delimitación de cuencas difirió a la generada con el SRTM, posiblemente por la resolución espacial y errores altimétricos dada la presencia de cultivos. Se calculó el Índice Topográfico de Humedad y el Factor Topográfico LS a nivel subcuenca. Como resultado final se generó un MDE con una resolución espacial de 10 m. Para mejorar este producto, se proyecta utilizar pares interferométricos en épocas sin cultivos y aplicar filtros para suavizar el MDE, pero que conserven la morfometría original. Además, se espera que este trabajo contribuya a mejorar el conocimiento actual sobre el proceso de elaboración y validación de un MDE con banda L en una zona de llanura, lo cual tiene un impacto positivo en la caracterización y modelación de las cuencas hidrográficas.

Palabras clave

SAOCOM, Banda L, MDE, InSAR, topografía, hidrología.

Clasificación de cultivos utilizando el algoritmo Random Forest en Google Earth Engine sobre imágenes Landsat

Crop classification using the Random Forest algorithm in Google Earth Engine on Landsat images

Havrylenko Sofia B.¹; Espindola Aime¹; Castiglioni Mario G.²

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Clima y Agua

² Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía. Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos

Resumen

Conocer la historia de uso agrícola del suelo es una fuente de información valiosa para numerosas aplicaciones, tales como estimar la extensión y rendimiento de los cultivos, identificar las prácticas de uso del suelo y su impacto en las propiedades edáficas, entre otras. Los sensores remotos son una herramienta útil para determinar la secuencia de cultivos ya que proveen información espacial con resoluciones temporales conocidas. Actualmente se dispone de una extensa variedad de software para el sensoramiento remoto, siendo una de ellas la plataforma de computación en la nube Google Earth Engine (GEE). Esta herramienta agiliza el análisis geoespacial, habilitando el acceso gratuito a repositorios de plataformas satelitales y posee un gran poder de cómputo para la generación de productos a gran escala, a través de una interfaz de programación en JavaScript y Python. El objetivo del presente trabajo fue conocer la historia de uso del suelo de distintos lotes correspondientes a una microcuenca de la Pampa Ondulada durante el periodo 2008-2019. La microcuenca de 1.495 ha se encuentra a 7 km al sureste de la localidad de Rojas (Buenos Aires). Se trabajó en distintos lotes ($n=23$) con una clasificación supervisada utilizando el algoritmo de aprendizaje automático Random Forest desde la plataforma GEE. Se emplearon imágenes satelitales de la colección Landsat 5 TM y 8 y los siguientes índices de diferencia normalizada: Índice de Vegetación (NDVI), Índice de Vegetación Verde (GNDVI), Índice de Agua (NDWI), Índice de Nieve (NDSI), Índice de Desnudez (NDBal), y el Índice de Vegetación Ajustado con el Suelo (SAVI) y de Vegetación

Mejorado (EVI). La clasificación fue realizada por períodos según las cuatro estaciones del año, identificando las categorías: maíz, soja de primera y de segunda, trigo, suelo desnudo, cuatro estadios de barbecho según el grado de enmalezamiento, monte, terrenos bajos y agua. Se generó un mosaico multitemporal de imágenes libre de nubes por período, teniendo en cuenta el mayor valor de reflectancia por píxel. Se calcularon los índices mencionados anteriormente y se los agregó como bandas a la imagen para realizar la clasificación supervisada. Se establecieron las áreas de entrenamiento según puntos de validación de campo y fotointerpretación visual de imágenes, con el apoyo del análisis de la curva de evolución del NDVI de MODIS de cada lote. Aleatoriamente se dividió el 70 % de las muestras para entrenamiento y el 30 % para validación y se ajustó un modelo con el algoritmo Random Forest. Al raster clasificado se le aplicó un filtro reductor morfológico. Para evaluar la confiabilidad de los resultados se calculó una matriz de confusión, obteniendo valores de exactitud dentro del rango 0,85 - 0,98 y un índice Kappa entre 0,84 - 0,96. De esta manera, se identificó durante los once años analizados una alta preponderancia de cultivos de verano, fundamentalmente soja (proporción promedio: 74 %), aunque en algunos lotes se incluyó al trigo como cultivo de invierno (proporción promedio: 25 %). En las tierras cercanas al curso de agua hubo una alternancia de uso del suelo: agricultura/vegetación espontánea, dependiendo de las características climáticas de la campaña.

Palabras clave

Google Earth Engine, uso del suelo, teledetección

Modelación y geoinformación como herramientas de estudio de la dinámica del acuífero en valles irrigados de zonas áridas*

Modeling and Geoinformation as study tools of the aquifer dynamics in irrigated valleys of arid zones

Montenegro Ayelen¹; Fernández Darío¹; Holzman Mauro²; Mañueco Lucia¹; Guiñazu Maira³

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Patagonia Norte, EEA Alto Valle

2 Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Jorge Usunoff"

3 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Investigación y Desarrollo Tecnológico para la Agricultura Familiar Patagonia

Resumen

El consorcio de Riego y Drenaje de Villa Regina forma parte de un extenso valle irrigado para la producción de frutales de pepita en la Provincia de Río Negro. Desde que comenzó a operar el sistema de riego se han detectado problemas asociados a dicha actividad y al drenaje, consecuencia de un ascenso paulatino del nivel del acuífero freático. Generar información territorial para los gestores del agua es fundamental para la toma de decisiones en el uso de dicho bien común. El objetivo principal fue integrar el modelado hidrogeológico del área y la teledetección como herramientas de análisis de los recursos hídricos subterráneos y superficiales. En campo se midieron datos hidrológicos y topográficos y se recolectaron datos suministrados por entes afines (caudales del río, lecturas freáticas, entre otros). En gabinete se elaboró el modelo conceptual hidrogeológico del área y se reprodujo el flujo subterráneo con el código Modflow calibrado con niveles freáticos invernales del 2018. Además, se calcularon índices espectrales de detección de cuerpos de agua en un año seco (2017) y un año húmedo (2018) y se lo relacionó con la napa freática. El modelo numérico se calibró con la conductividad hidráulica, la conductancia de los cuerpos de agua superficiales y la recarga del sistema, de esta manera se validó el modelo conceptual planteado. El R arrojó un valor de 0,99, confirmando un

buen ajuste y demostrando un grado elevado de correlación entre los datos de nivel freático observados y calibrados. Los índices espectrales fueron consistentes con la crecida del año 2018, cuantificando un aumento del área cubierta por agua de 420.000 m² y se registró un aumento del nivel freático promedio de 0,7 m, confirmando el impacto de la crecida en las aguas subterráneas. Se concluye que el uso de herramientas de modelación, integrada al uso de información geográfica, permite analizar y comprender la interacción de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en un sistema complejo como lo es un valle irrigado Norpatagónico.

Palabras clave

Agua superficial, agua subterránea, acuífero freático, modelación matemática, información geográfica.

Introducción

En las zonas áridas y semiáridas del mundo el agua es clave para la agricultura, su escasez puede ser una limitante para el desarrollo productivo. En este escenario, se torna fundamental la necesidad de concentrar esfuerzos para optimizar el uso del agua en todos sus niveles. La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) posee una visión sistémica, promueve la administración coordinada de los diversos usos del agua y los

1 Modelación e Información Geoespacial: Análisis de eventos climáticos y antrópicos en la dinámica del acuífero en el distrito de riego de Villa Regina. <https://inta.gob.ar/documentos/modelacion-e-informacion-geoespacial-analisis-de-eventos-climaticos-y-antronicos-en-la-dinamica-del-acuifero-en-el-districto-de-riego-de-villa-regina>

recursos ambientales conexos, con el fin de maximizar el bienestar económico de manera equitativa y sustentable (Guiñazú, 2017). Esta mirada aportará herramientas para coordinar acciones conjuntas entre las instituciones que intervienen en la gestión del agua a distintos niveles.

Argentina es un país que posee una riqueza hidrológica excepcional, tanto superficial como subterránea. En las regiones áridas y semiáridas, la segunda es esencial y permite superar períodos de eventos climáticos extremos.

En relación a los procesos de recarga y descarga de aguas subterráneas, estos pueden cambiar tanto temporal como espacialmente dependiendo de la zona donde entra o sale agua del acuífero, este enfoque sistémico será uno de los aspectos a analizar en el presente trabajo.

Los factores antrópicos también ejercen presión en las aguas subterráneas. En el caso particular del Alto Valle de Río Negro, se han registrado aumentos en los niveles freáticos desde que comenzó a operarse el sistema de riego, debido a que la recarga por el uso del agua para riego es mayor que la descarga natural, numerosos estudios en la zona han analizado dichas fluctuaciones freáticas en el tiempo y en el espacio; los resultados pueden derivar en salinización de las tierras agrícolas y exceso de agua en la zona radicular (Horne et al., 1992; Montenegro, 2014). Actualmente, no hay un modelo conceptual del funcionamiento del sistema hidrogeológico a la

escala del distrito de riego de Villa Regina, pero existe información dispersa en diversos entes, que sirve para construirlo.

Los gestores del agua deben optimizar los recursos hídricos como los económicos, por ende, es primordial contar con herramientas técnicas que les contribuyan a tomar decisiones en el uso del agua y su distribución. Conocer cómo es el comportamiento del agrosistema, qué factores influyen en las fluctuaciones del acuífero, así como la interacción de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos brindará herramientas que contribuyan a la GIRH y a la sustentabilidad del agrosistema. En la actualidad, hay numerosas herramientas que permiten un abordaje integral en diversos ámbitos de las ciencias. En el presente trabajo se implementarán herramientas de SIG, teledetección y el modelo matemático Modflow (McDonald y Harbaugh, 1988), para contribuir al conocimiento de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en el área del Consorcio de Riego y Drenaje de Villa Regina (CRyDVR).

Alto Valle de Río Negro y Neuquén

El Alto Valle de Río Negro y Neuquén es una importante zona bajo riego productora por excelencia de frutales de pepita (peras y manzanas), dicha economía es troncal para el desarrollo regional de Río Negro. Consiste en 60.000 hectáreas sistematizadas bajo la infraestructura de riego más importante de la provincia: el "Sistema Integral de

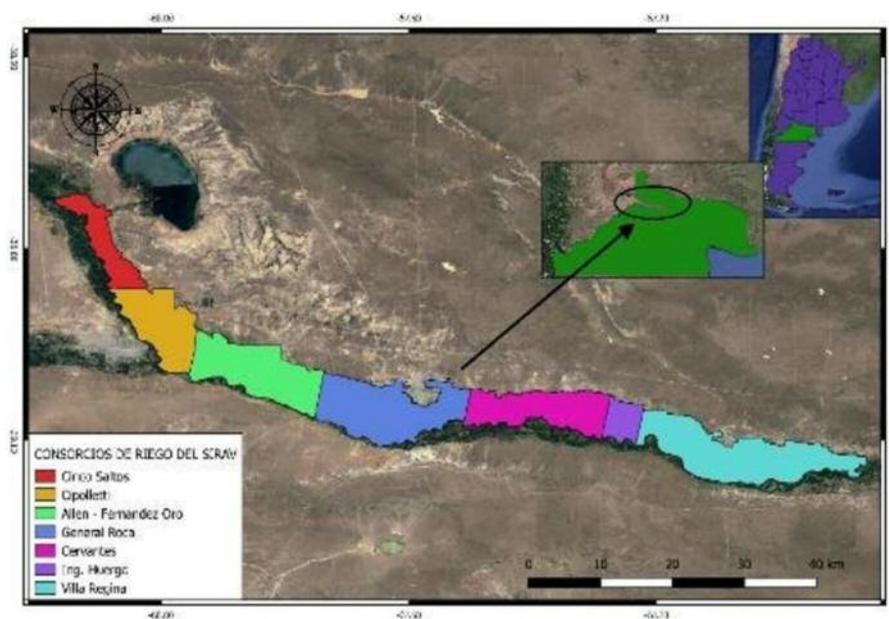


Figura 1. Distritos de Riego que conforman el Sistema Integral de Riego del Alto Valle (SIRAV).

La región se encuentra en la diagonal árida Argentina que se caracteriza por un balance hídrico negativo, es decir, que la pluviometría es baja y la evapotranspiración potencial (ET_p) es elevada, denotando un marcado déficit hídrico. Esto indica la importancia del riego en la zona para poder producir un cultivo (FAO, 2015).

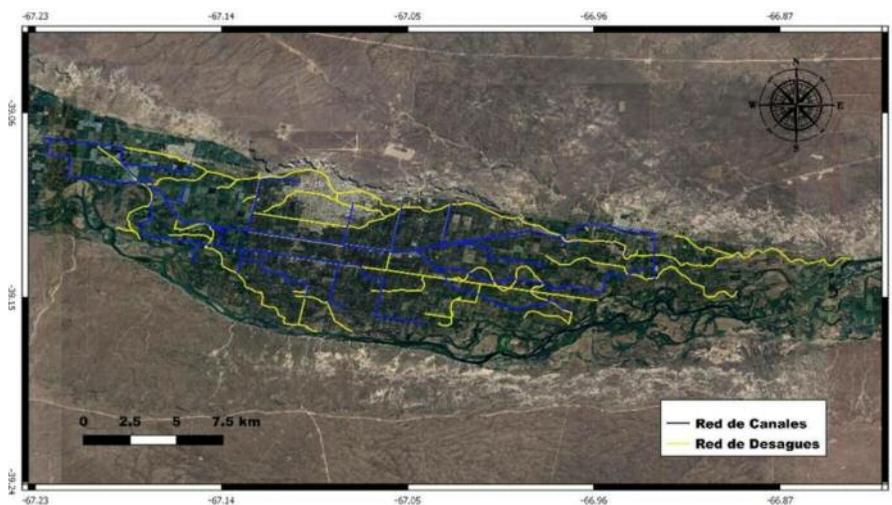


Figura 2. Red de riego del distrito de riego de Villa Regina.

Riego del Alto Valle (SIRAV)". Actualmente, cuenta con siete consorcios de primer grado encargados de la operación y mantenimiento de las redes de riego y drenaje que se observan en la Figura 1.

Consortio de Riego y Drenaje de Villa Regina

El Consorcio de Riego y Drenaje de Villa Regina se encuentra al final del SIRAV (Figura 1) y abarca las localidades y zonas rurales de General E. Godoy, Villa Regina y Chichinales con una superficie bajo riego aproximada de 13.400 hectáreas.

La red de riego del Distrito está conformada por una extensa red de canales y desagües que se distribuyen a lo largo del área de estudio (Figura 2) y una red freaticométrica que se mantiene desde la década de 1980, quedando actualmente 51 freáticos activos. Ningún canal está cementado y existe una pérdida de agua por filtraciones del 10 % del caudal transportado que va directo al acuífero freático (CIL-AyEE, 1991).

En el distrito la dinámica del drenaje se ve fuertemente influenciada por los niveles del río y por drenes naturales, siendo una excepción al resto del valle. En plena época de riego los niveles del río ascienden de forma tal que impiden la normal evacuación del agua y se forman lagunas que abarcan grandes extensiones de tierra, en invierno los niveles descienden considerablemente, pero los cuerpos de agua mantienen un mínimo nivel (com.pers., Horacio Starkloff, 2019).

El INTA Alto Valle, la AER Villa Regina y el distrito trabajaron en conjunto elaborando la cartografía de base, con el objetivo de conformar una base de datos geográfica para el distrito. Algunas

capas obtenidas fueron: capa de red oficial de canales y desagües actualizada al 2020, red de comuneros, capa de compuertas, recorte de estudios de suelo regionales, capa de freáticos con mediciones mensuales, capa catastral unida a la base de datos de usuarios del sistema, entre otras (Montenegro et al., 2018).

Se realizó una compilación de datos afines y una búsqueda bibliográfica en las bases de datos existentes de organismos vinculados a la temática hídrica en la región. Esta información fue utilizada como insumo para el modelo matemático y para robustecer la base de datos geográfica (BDG) ya existente.

En base al conocimiento del área tanto por estudios previos y recopilación de datos como por entrevistas con técnicos del consorcio de riego, se elaboró el modelo conceptual hidrogeológico del área. Se reprodujo el flujo subterráneo mediante su simulación numérica en régimen estacionario con el código Visual Modflow, utilizando subrutinas o paquetes para los términos de entrada y salida al sistema, evaluando los resultados y comprobando que el movimiento de agua se condice con el modelo conceptual propuesto. La calibración se realizó con el método de prueba y error, que resulta el más difundido hasta el momento. Para las observaciones que requiere el modelo se usaron las mediciones de la red freaticométrica de agosto del 2018, momento del año en el cual se considera que la capa freática no tiene influencia antrópica.

El software libre QGIS se utilizó para la conformación de las distintas capas de la base de datos

geográfica del distrito y para la elaboración del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) y el Índice de Diferencia de Agua Normalizado Modificado (MNDWI) (Xu , 2006); ambos son índices espectrales que utilizan las bandas del verde, infrarrojo cercano y medio para detectar agua en superficie.

Los índices se calcularon procesando imágenes satelitales Sentinel 2 en agosto del 2017 y del 2018, épocas que surgieron del análisis de los caudales del río, mostrando dos condiciones hidrológicas contrastantes, es decir, un año seco (2017) y un año húmedo (2018). Se analizó el impacto temporal de dicha crecida en el acuífero, para ello se seleccionaron todos aquellos freáticos que se encontraban a menos de 2 km del río, dado que se ha observado que a mayor distancia de este no se evidencia influencia en la altura de la capa freática (Montenegro, 2014). Se elaboraron los freatogramas de ambos años de los pozos seleccionados; se analizaron para corroborar si entre los meses de agosto se registró un ascenso y, en caso de confirmarlo, poder determinar su magnitud. Se calculó el promedio de ascenso del nivel freático con las diferencias de nivel entre agosto de ambos años.

Resultados y discusión

Modelo hidrogeológico conceptual

El distrito de riego y drenaje de Villa Regina conforma una porción del valle del río al Este de la región, con un ancho variable entre los 3 y 11 km y un largo aproximado de 31 km.

Geología y geomorfología

En el área bajo estudio se reconocen depósitos de terrazas que están circunscriptos al recorrido del río que posee un cauce del tipo meandriforme, siendo comunes las lagunas en collera y meandros abandonados que muestran albardones semilunares sobre sus pendientes internas (Leanza et al., 2001).

Hidrogeología e hidrodinámica

El área posee dos acuíferos: uno somero y libre y uno confinado a mayor profundidad que se encuentra debajo del hidroapoyo.

El acuífero freático posee un espesor que varía alrededor de 12 metros. En épocas de riego, puede elevarse hasta aflorar en determinados sec-

tores. En cambio, en épocas de no riego su profundidad desciende notablemente pudiendo variar hasta los 4 metros de profundidad aproximadamente.

El hidroapoyo es una base impermeable que está a 12 metros de profundidad aproximadamente. La conductividad hidráulica se encuentra en un rango de 83 m.día⁻¹ hasta 825 m.día⁻¹, denotando elevada heterogeneidad del área, este distrito se caracteriza por tener un comportamiento distintivo y con valores más elevados de los parámetros hidráulicos. El coeficiente de almacenamiento o el rendimiento específico varían entre un 5 % y un 30 %, lo cual califica al acuífero como libre; CIL-AyEE (1991).

Debido a la disponibilidad de agua superficial, el recurso subterráneo no es muy explotado en dicho valle. En relación a la hidrodinámica del distrito, en el año 1987, el estudio de una red freática regional en todo el Alto Valle determinó el rumbo general del flujo, siendo éste NO – SE, finalizando en el río. Villa Regina es una excepción a dicho esquema, ya que drena hacia el Primer Salado al norte del área y al río al sur, comportándose como una isla con zonas críticas al centro como lo plasma (Rossi, 2013).

Comportamiento del nivel freático estacional debido al riego

Existen cuatro momentos bien diferenciados respecto al nivel de la capa freática en relación a la práctica de riego convencional en el valle. Esta, se realiza en base al ciclo de los frutales, en los meses de invierno no se riega ya que coincide con el receso invernal de los cultivos. En consecuencia, la recarga se produce en los meses de primavera, verano y los primeros días de otoño. De mayo a agosto inclusive no se produce recarga por riego y se entiende que el acuífero está en equilibrio (CIL-AyEE, 1991). La Figura 3 muestra un freatograma típico para la zona, calculado a partir de las mediciones mensuales en el período 2010-2019. En el mismo se marcan los momentos más importantes para registrar las fluctuaciones de la capa freática y su relación en el tiempo con respecto a la práctica del riego.

Para realizar la calibración del modelo numérico se requieren datos de Niveles Freáticos (NF) en el área. Para el presente estudio, se contó con una base de datos de NF del período 2010-2019 con



Figura 3. Freatígrama típico de la capa freática en el valle.

mediciones mensuales, aportada por el Consorcio. La red cuenta con 51 freaímetros dispersos en el área, lo que da una densidad de 263 hectáreas por freaímetro, la Figura 4 muestra la configuración espacial de la red de observación utilizada para la calibración.

Cuerpos de agua superficiales

El acuífero freático se caracteriza por presentar una relación efluente – influente con el río y los desagües, que depende de los caudales y niveles de los cuerpos (Rossi, 2013). La Figura 4 muestra los cuerpos de agua que están activos todo el año. El río Negro funciona como una zona de transición, es decir, que el agua circula permanentemente entre el río y el acuífero y el nivel del primero define si el agua entra o sale del mismo.

Los otros cuatro cuerpos de agua que se observan en la Figura 4 son desagües que forman parte de la red oficial de drenaje, extraen agua del acu-

ífero todo el año, el caudal extraído depende del nivel que tengan. Durante los meses de invierno el nivel de agua que poseen los desagües está en equilibrio con el acuífero, siendo este, el nivel anual más bajo, representando el equilibrio natural del agrosistema. A partir de septiembre y hasta abril del año siguiente, se activa la red de riego del distrito, recargando el sistema.

Recarga

En el período 2010-2019 la estación Meteorológica de Villa Regina registró una Evapotranspiración Potencial media anual de 1.136 mm y una precipitación media anual de 254 mm. Como se detalló en apartados anteriores el déficit hídrico es cubierto por el riego. Los caudales que ingresan al sistema fueron aportados por el distrito, registrando una media en el período de 13.382 l.s-1, datos utilizados para contabilizar la recarga por riego.

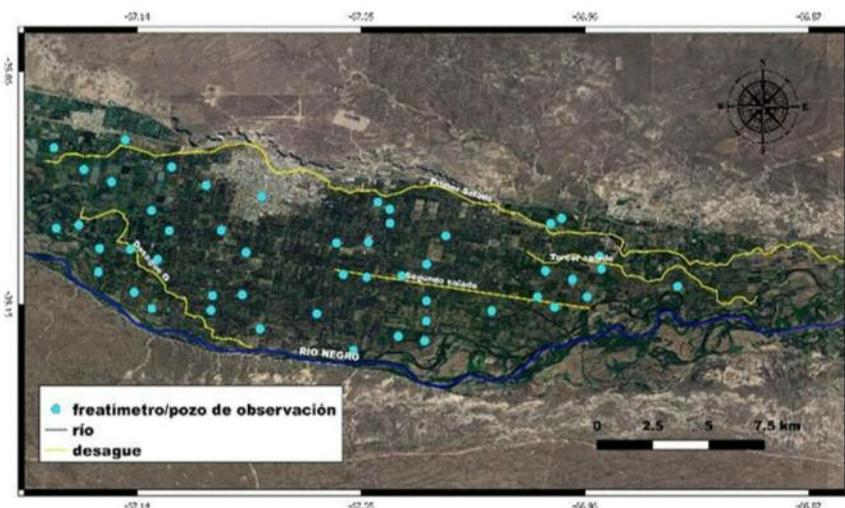


Figura 4. Cuerpos de agua superficial activos todo el año y red de freaímetros.

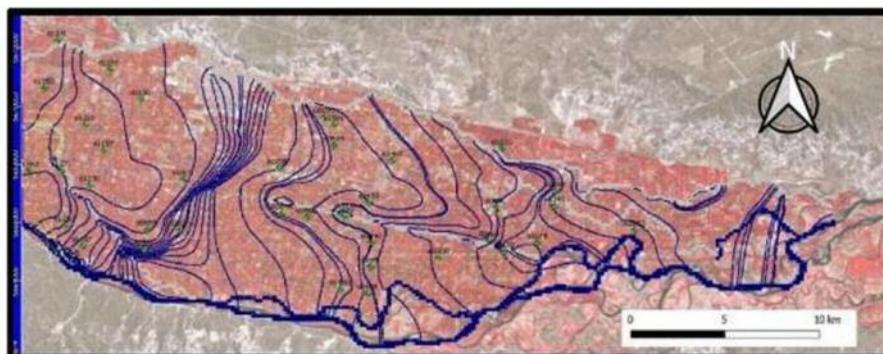


Figura 5. Calibración en Estado Estacionario en agosto del 2018.

Modelo numérico

En el visual Modflow se construyó el modelo numérico indicando los límites del área a modelar, la discretización del mismo, las entradas y salidas de agua en su estado inicial y las condiciones de borde iniciales (niveles de los cuerpos de agua y datos medidos a campo, entre otros). El modelo conceptual se calibró satisfactoriamente con la simulación numérica, obteniendo productos como las isopiezas, el flujo y la velocidad del agua y el balance general de agua del sistema, cuyo resultado se corresponde con el modelo hidrogeológico. El mapa equipotencial (Figura 5) confirma que existen dos direcciones de flujo general, una hacia el Norte y otra hacia el Sur. En la configuración espacial de las isopiezas se observa la influencia de los desagües dentro del área y como estos sacan agua del acuífero, además, se observa cómo en algunos sectores el río actúa como ganador.

Se obtuvieron mapas de la magnitud y dirección de los vectores velocidad del flujo y su sectorización, por ejemplo, zonas con mayor velocidad y zonas en las cuales el agua se mueve lentamente en función al gradiente hidráulico. Dicho comportamiento puede estar asociado exclusivamente a las características hidrogeológicas que denotan una elevada heterogeneidad en el área.

Estadísticos

Para la calibración se utilizaron 35 puntos de observación, se alcanzó un elevado nivel de ajuste para agosto del 2018; sustentando que el modelo numérico planteado coincide con el modelo conceptual del área. La media residual absoluta arrojó un valor de 0,19 metros, que resulta adecuado dado el tamaño del área a muestrear (162 km²), la densidad de puntos de observación y la complejidad del área, en concordancia con Pavese et al. (2013). El error cuadrático

medio (RMS) de 0,22 m y el RMS normalizado 1,57 %, resultan adecuados. El R de 0,99 confirma un buen ajuste, demostrando un grado elevado de correlación entre los datos observados y los datos calibrados.

Parámetros calibrados

Los parámetros que se utilizaron para calibrar el modelo en estado estacionario fueron: la conductividad hidráulica (k), la recarga y la conductancia del río y los desagües.

La k se zonificó en un rango de variación de 10 m.día⁻¹ hasta 810 m.día⁻¹, siendo este último, un valor extremo y elevado que se corresponde con el extremo medido de transmisividad en el CIL-AyEE, (1991). Se obtuvo un total de nueve zonas. Este resultado denota la marcada heterogeneidad del área en relación a los materiales presentes y el comportamiento diferente del área de estudio como obtuvieron Pavese et al., 2013 y Polla et al., 2013. Los valores de dicho parámetro aumentan desde el centro a los bordes del área, tanto al norte como al sur, siendo esperable dado su comportamiento de isla.

En relación a la recarga, para que el modelo converja se debió disminuir su valor inicial y se dividió en seis zonas, cabe destacar que al ser la calibración en estado estacionario no se considera la variación temporal de dicho parámetro.

La conductancia del río y los drenes que se obtuvo fue más elevada que la teórica, y sectorizada a lo largo de todos los cuerpos de agua (Figura 3) que intervinieron en el modelado, el resultado indicó más heterogeneidad en el área y una interacción río – acuífero más compleja con comportamientos localizados longitudinalmente.

Balance de agua total

El balance de masa de agua entre las entradas

y las salidas del acuífero en el estado estacionario calibrado muestra que ingresa y sale del acuífero un volumen de 68,3 Hm³. Como era de esperarse, el 75 % del agua que ingresa al acuífero es evacuada por los desagües, ese volumen corresponde a la suma de los cuatro desagües activos.

El 20 % del agua que entra y que sale lo hace por el río Negro, siendo éste una zona de transición, la dirección del caudal de entrada y salida dependerá de la altura del pelo de agua en todo su tramo. El 54 % del agua que entra lo hace por la recarga. En este caso ese valor representa la recarga neta, es decir, el agua de riego que percola, lo que lo constituye en el factor preponderante en relación a la entrada de agua al acuífero. El 24 % del agua que ingresa lo hace por un límite fijo establecido como condición de borde, demostrando la conexión hídrica con el consorcio colindante, que es el de Ingeniero Huergo.

Análisis de la condición hidrológica del río y su relación con la freática

Índices espectrales de agua (NDWI Y MNDWI)

Se calcularon los índices MNDWI (Xu, 2006) y NDWI (Mcfeeters, 1996) con imágenes Sentinel 2 para ambos años analizados. Los resultados mostraron una buena performance a la hora de detectar la configuración espacial del río, siendo complementarios en la zona. Los índices adoptan valores que van de -1 a 1, los valores de los índices superiores a cero corresponden a coberturas de cuerpos de agua. No obstante, en la zona urbanizada, determinados sectores que se corresponden con techos muy brillantes presentaron el mismo valor de los índices, generando que se mezclen las coberturas, estos fueron eliminados para no ser contabilizados en la superficie final. De los índices obtenidos se vectorizó el río en ambas escenas y se calculó el área cubierta por cada uno de ellos, la Tabla 1 muestra el resultado en ambos años.

En la escena del 2018 los índices detectaron una mayor área cubierta por agua, siendo esperable, ya que el caudal era casi tres veces mayor que

en el año 2017. Cabe destacar que el incremento de la superficie cubierta en el río no fue tan elevado en relación al incremento del caudal, lo que supone un bajo desborde dado la geomorfología propia del río. El pelo de agua refleja dicho comportamiento, es decir, como aumentó la cota del río por el elevado caudal, siendo el soportado por la sección del cauce, luego desbordó y fue lo que los índices pudieron registrar. La metodología aplicada logró registrar el fenómeno natural, siendo una herramienta útil para avanzar en el conocimiento de la dinámica del río y para analizar eventos extraordinarios y su impacto en el sistema de estudio, como lo es una crecida de tal magnitud.

Interacción río - acuífero en el contexto hidrológico del 2018

En los veinte freatímetros analizados se registró un aumento de la freática de un año al otro, en sólo tres los ascensos fueron menores a 0,20 m, en los restantes los ascensos superaron los 0,38 m, registrando en el 60 % elevaciones superiores a los 0,7 m. Según la base de datos climática provista por Agrometeorología de la EEA Alto Valle, en el transcurso del año la precipitación fue de 220 mm, valor que se encuentra por debajo de la media de 235,5 mm, por lo tanto, el aporte de lluvias no fue significativo, como era de esperarse debido a ser una zona árida. En relación a la afectación de la recarga por riego, en el periodo invernal no hay influencia de dicha práctica, y el acuífero mantiene su estado de equilibrio natural. Además, al analizar los caudales mensuales a lo largo del año de análisis estos se mantuvieron estables y alrededor de los 400 m³.s⁻¹ como en el mes de agosto del 2017, denotando el incremento del nivel freático cuando subió el caudal.

Este análisis indica que la elevación registrada podría estar dada por un factor natural, en este caso, el mayor caudal del río, que pudo haber generado un aporte hacia el acuífero provocando un ascenso en el nivel de la freática.

Fecha de la Imagen	Caudal (m³.s⁻¹)	Altura del pelo de agua (m)	Superficie cubierta por agua (Km²)
1/8/2017	319	1,5	6,32
1/8/2018	1.158	3	6,74

Tabla 1. Agua cubierta y condiciones hidrológicas en ambos años.

Conclusiones

De la construcción del modelo numérico y su calibración en estado estacionario se desprende que el distrito es un área hidrogeológicamente particular con respecto al resto del Alto Valle. Los parámetros hidráulicos e hidrogeológicos son más elevados, lo que le confiere un drenaje natural diferente, que se ve obstaculizado en la zona de Chichinales debido a la interacción río - acuífero. Se destaca también el comportamiento especial a la hora de evacuar el agua subterránea, con dos direcciones bien marcadas, hacia el Sureste con dirección al río y hacia el Noreste con dirección al desagüe troncal del distrito: "Primer Salado", lo que le confiere un comportamiento similar al de una isla.

En relación a las herramientas de teledetección, se puede concluir que los índices espectrales de detección de cuerpos de agua como el NDWI y el MNDWI lograron captar el nivel de derrame del río establecido por el aumento del caudal en el año 2018. La metodología es simple y efectiva y permite analizar fenómenos naturales y antrópicos con los cambios que se producen en el agrosistema en relación a los cuerpos de agua superficiales. Los índices pueden ser poderosas herramientas para el estudio de la dinámica de un cuerpo de agua superficial y la determinación y mapeo de zonas temporalmente anegadas.

Con el análisis de las bases de datos de diversas variables (clima, caudal y freáticos) se logró inferir un aumento del nivel freático promedio debido a la recarga por el río, coincidente con la interacción del río-acuífero expuesta por el modelo numérico.

Para profundizar en el conocimiento hidrogeológico del distrito de Villa Regina se recomienda para futuras investigaciones validar el modelo numérico del sistema en estado transitorio, es decir, incorporar en el análisis la variable "tiempo" complejizando el análisis, esto permitirá evaluar el comportamiento del manejo parcelario del agua y la eficiencia de la red de riego en una temporada.

En relación a la detección de cuerpos de agua superficiales, se recomienda aplicar otros índices y metodologías para dicho fin y comparar su performance para llegar a obtener el más adecuado, así como imágenes con resoluciones espaciales diferentes.

Es fundamental el registro, la conformación y

continuidad de bases de datos de parámetros de diversa índole para generar insumos que sirvan a la toma de decisiones.

Para finalizar, entre las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo, se puede afirmar que las herramientas utilizadas son adecuadas para generar conocimiento científico sobre el comportamiento e interacción de las aguas superficiales y subterráneas. Comprender la complejidad del agrosistema aportará para la GIRH y serán sustento para los tomadores de decisiones en la generación de políticas públicas y en la planificación y gestión de los recursos hídricos en la región.

Bibliografía

- CIL-AyEE (Consortio Iconas Latinconsul - Agua y Energía Eléctrica). (1991). Estudio para el aprovechamiento integral del Río Negro. Etapa II. Investigaciones y estudios Hidrogeológicos. Informe Final. Tomos 1-2-4. Río Negro.
- Food And Agricultural Organization (FAO). (2015). Documento de trabajo N° 2. Disponibilidad de Recursos y Condiciones Agroclimáticas. Proyecto FAO UTF ARG 017. Desarrollo institucional para la inversión. 87 p.
- Guiñazu Micames, M. S. (2017). Estudio de caso sobre gestión comunitaria del agua de riego en parajes Lote G y el 15, Municipio Contralmirante Cordero, Río Negro, Argentina. Tesis de Maestría en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina
- Leanza, H. A.; Hugo, C. A. (2001). Hoja Geológica 3966-II y III Villa Regina. Formación Chichinales en el río Negro al sur de Villa Regina. Provincia de Río Negro. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín No 309. 53p. ISSN 0328-2333.
- Mc Donald, M. G.; Harbaugh, A. W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. Techniques of Water Resources Investigations 06-A1. United States Geological Survey.
- Mc Feeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal Remote Sensing. Vol. 17. No.7. 1425-1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.
- Montenegro, A.; Fernandez, E.; Ciccioli, J. J.; Vettori, O.; Starkloff, H. (2018). Cartografía colaborativa – Proceso de aprendizaje y comprensión del territorio del distrito de riego de Villa Regina. I Jornadas Patagónicas de Acceso y

Gestión del Agua en la Agricultura Familiar. 331-336. Plottier. Argentina.

- Montenegro, A. (2014). Análisis de la incidencia de factores que intervienen en la sustentabilidad del agro sistema frutícola en "Colonia la Lucinda (Río Negro)". Tesis de grado para la Licenciatura de Saneamiento y protección ambiental. Facultad de Ciencias del Ambiente y la Salud. Universidad Nacional del Comahue. Neuquén. Argentina.
- Rossi, P. (2013). Agua subterránea en el Alto Valle de la Provincia de Río Negro. Departamento Provincial de Aguas, Provincia de Río Negro. 37 p. <https://dpa.rionegro.gov.ar/?contID=30234>.
- Xu, H. (2006). Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int. J. Remote Sens.* (27): 3025-3033.

Modelización del consumo de agua de la caña de azúcar con diferentes regímenes de manejo agrícola

Modeling of water consumption in sugarcane with different agricultural management regimes

Van Meer Howard¹; Anschau Alicia²; Havrylenko Sofia B.²; Feler Maria V.²; Barrionuevo Néstor²; Espindola Aime²

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Tucumán Santiago del Estero, EEA Santiago del Estero

2 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Clima y Agua

Resumen

La caña de azúcar de secano, junto con la selva subtropical, constituye la mayor cobertura terrestre de la parte alta de la cuenca Salí-Dulce en el norte de Argentina, abarcando aproximadamente el 13,3 % de la superficie total. Junto con las plantaciones de cítricos, la caña de azúcar es una importante fuente de ingresos para la economía regional y en los últimos años, aún más con el creciente interés de la caña de azúcar para biocombustibles. Actualmente, en la cuenca alta del río Salí-Dulce, se produce caña de azúcar bajo diferentes regímenes de manejo según el grado de tecnificación de los agricultores particulares. Así, se distinguen al menos tres tipos de productores agropecuarios: 1) agricultores grandes, altamente capitalizados y tecnificados, 2) agricultores pequeños, no capitalizados y de baja tecnificación y 3) miscelánea entre los dos. Con el propósito de generar información sobre la producción de la caña de azúcar y adquirir conocimiento espacial sobre su consumo de agua, se propuso como objetivo simular los principales esquemas de manejo agrícola para la caña de azúcar en la cuenca alta Salí-Dulce a partir de un modelo hidrológico ya calibrado y validado en el área de estudio. A tal efecto, se aplicó el modelo Soil and Water Assessment Tool¹ (SWAT), el que a la hora de su uso ya contaba con una Eficiencia Nash Sutcliffe (NSE) y un Coeficiente de Determinación (R²) del 0,70 y 0,71 para calibración (1995–2005), y 0,68 y 0,69 para validación (2006–2016), respec-

tivamente. Asimismo, se consideró el concepto de Huella Hídrica² (HH), incluyendo en este análisis exclusivamente la HH azul (referida al consumo del agua dulce superficial o subterránea, a lo largo de toda la cadena de producción de un producto, sin ser devuelta a la cuenca hidrográfica) y la HH verde (referida al consumo del agua de lluvia, a lo largo de toda la cadena de producción de un producto, quedando incorporada en algunas de sus formas en la cuenca hidrográfica). En ese contexto, se incorporaron a SWAT tres escenarios posibles distribuidos espacialmente en los sectores donde potencialmente ocurrirían las prácticas: 1) nivel de tecnificación alto en el que se dispone de agua de riego cuando la planta entra en estrés, se aplica fertilización sin límites y se resiembra la caña cada 5 años con una rotación de un año de soja; 2) nivel de tecnificación medio donde se aplica un riego de 100 mm durante el ciclo vegetativo, se aplican fertilizantes con limitación y se resiembra la caña cada 6 años; 3) nivel de tecnificación bajo donde no se dispone de agua de riego ni de fertilizantes y se resiembra la caña cada 7 años. Como resultado se determinó la HH_{verde+azul} según los tres esquemas de manejo por tonelada de caña de azúcar producida: 79,04 m³.tn⁻¹ (Consumo_{agua verde}: 353 mm, Consumo_{agua azul}: 111 mm) para el nivel de tecnificación alto, 91,69 m³.tn⁻¹ (Consumo_{agua verde}: 433 mm, (Consumo_{agua azul}: 50 mm) para el nivel de tecnificación medio y 123,14 m³.tn⁻¹ (Consumo_{agua verde}: 475 mm, (Consumo_{agua azul}: 0 mm) para el nivel de tecnifica-

1 Van Meer H., Feler M. y Prieto Garra D. (2014). Hydrological Response of a Mountainous Catchment to Different Climate Scenarios. 2014 SWAT Conference Pernambuco, Brazil. <https://swat.tamu.edu/media/99118/b1-3-van-meer.pdf>

2 Huella Hídrica: como indicador multidimensional empírico que indica dónde, cuándo y cuánto volumen de agua se consume y contamina.

ción bajo. De lo que se concluye que SWAT puede ser una herramienta valiosa para proporcionar una visión general del consumo de agua de la caña de azúcar y, dado que este tipo de esquema de manejo se da exclusivamente en esta zona, la información resultante podría utilizarse como un insumo más en la planificación de los recursos hídricos.

Palabras clave

Huella hídrica, modelo SWAT, planificación de recursos hídricos, caña de azúcar.

Modelación del uso de la tierra e infraestructura en la cuenca alta de La Picasa (Córdoba)

Modeling of land use and infrastructure in the upper basin of La Picasa (Cordoba)

Videla-Mensegue Horacio¹; Corigliano José²; Macchiavello Alejandra¹; Veldhuizen Ab³; Kroon Timo⁴; Romero Verastegui Betsy⁴; Álvarez Javier⁵; López Sebastián⁵; Guillén Nicolás⁵; García Marcelo⁵

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Córdoba, EEA Marco Juárez, AER Laboulaye

2 Universidad Nacional de Río Cuarto, Facultad de Agronomía y Veterinaria

3 Wageningen University and Research, Netherlands

4 Deltares, Netherlands

5 Universidad Nacional de Córdoba

Resumen

La actividad humana y el cambio climático están generando severas presiones sobre los recursos naturales que se manifiestan en desequilibrios sobre el ciclo hidrológico, biodiversidad y producción de alimentos. El objetivo de este trabajo fue comparar indicadores ambientales y económico – productivos calculados a partir de escenarios de modelación co-diseñados representando cambios en el uso de la tierra y aumento de la red de canales en la cuenca alta de La Picasa (CALP). El estudio se focalizó sobre el oeste de la cuenca de La Picasa correspondiente al territorio de Córdoba (245.000 ha). Junto a actores referentes del territorio, se co-diseñaron escenarios de modelación, por un período de 10 años, para evaluar la situación actual (E0, 50 % soja-soja (S-S), 30 % soja-maíz (S-M) y 20 % trigo/soja (T/S), áreas no agrícolas con pasturas naturales; y una red de canales de 133 km de longitud), aumento de la red de canales (E1, 792 km de canales), intensificación en rotación agrícola (E2, 20 % S-S, 30 % S-M y 50 % T/S) y pasturas (E3, 20 % S-S, 30 % S-M, 30 % T/S, y 20% alfalfa). La herramienta de modelación consistió en el acoplamiento del modelo agrohidrológico SWAP-WOFOST y el modelo de aguas subterráneas iMOD previamente calibrados para el área de estudio. Se calcularon indicadores ambientales (nivel freático, NF; recarga, R; evapotranspiración de cultivo, ETc) y económico – productivos (producción equivalente en soja, PES; y valor bruto de la producción, VBP). Los resultados muestran que los escenarios E2 y E3 generaron

mayores cambios en todos los indicadores en comparación a E0 y E1. E3 mostró mayor efecto sobre NF (178 cm) seguido por E2 (NF 128 cm) y E1 (122 cm). En E0, la R fue 123 mm.año⁻¹ mientras que los menores valores de R fueron logrados en E3 (46 mm.año⁻¹) y E2 (100 mm.año⁻¹). E1 no mostró efectos sobre R. PES aumentó un 16 % en E2 comparado con E0, variando de 908.000 t de soja/año a 1.055.000 t soja/año. Por el contrario, E3 se redujo un 11 % comparado a E0 disminuyendo 102.000 t de soja/año. El VBP aumentó 16 % en E2 (37.8 millones u\$) comparado a E0 (232 millones u\$). E3 no logró compensar el rendimiento económico de los cultivos anuales de cosecha reduciendo el VBP 11 % significando 26 millones de USD menos producidos en CALP. La ETc en E0 fue 830 mm.año⁻¹ siendo 85 % transpirada, 14 % evaporada y 1 % conducida por canales. En cambio, en E3 y E2 la ETc fueron 9 y 6 % superiores a E0 (907 y 854 mm, respectivamente). La transpiración fue 6 y 20 % superior en E2 y E3 en comparación a E0. En E1 el movimiento de agua por canales aumentó un 400% en comparación a E0. Los resultados mostraron que el incremento en la intensificación del uso del suelo, ya sea con pasturas o doble cultivo de cosecha, generan un importante efecto sobre el NF, R, PES y VBP. Además, el aumento de la red de canales no generó impactos importantes sobre el NF.

Palabras clave

Modelación, gestión territorial, recursos hídricos.

Introducción

La actividad humana y el cambio climático están generando severas presiones sobre los recursos naturales que se manifiestan en desequilibrios sobre el ciclo hidrológico, biodiversidad y producción de alimentos. En la cuenca alta de La Picasa (Córdoba, CALP) estos impactos se manifiestan a través de inundación-anegamiento que destruyen cosechas, afectan las viviendas rurales, interrumpen el normal funcionamiento de caminos rurales y amenazan ciudades y poblaciones. En períodos húmedos se producen desbordes de lagunas y se originan líneas de escurrimientos concentrados que se dirigen hacia la laguna La Picasa (Laboranti, 2001; Monti, 2002).

Estos desafíos para un manejo sostenible de los recursos naturales requieren una planificación espacial interactiva y sensible al contexto para lograr una gobernanza integral de la cuenca (Horn y Meijer, 2015). Esta gestión integral de la cuenca (GIC) requiere el involucramiento y participación de todos los actores sociales o partes interesadas (PI) para alinear intereses, sincronizar acciones, mejorar la coherencia de las políticas y promover el desarrollo institucional para un uso sostenible de los recursos naturales. Un proceso de GIC efectivo permite mejorar la comprensión entre las PI de los valores, condiciones y dinámicas dentro de la cuenca. En este proceso interactivo, todas las PI discuten y acuerdan una visión compartida para lograr objetivos múltiples con respecto a la producción de alimentos, agua, suelo, clima y biodiversidad con un horizonte de largo plazo y la integración con los servicios ecosistémicos en la toma de decisiones.

La implementación de un proceso de GIC consiste en cuatro fases: a) concientización y entendimiento compartido de las PI, b) desarrollo de una visión y planificación compartida, c) implementación de los planes, y d) análisis de aprendizajes e impactos. La fase a) tiene por objetivo mejorar la conciencia y el entendimiento compartido entre las PI sobre el estado de la cuenca discutiendo diferentes valores (por ejemplo, culturales, ecológicos, económicos), cambios históricos y diversas interacciones que ocurren en el contexto socioecológico. La fase b) tiene por objetivo desarrollar una visión y una estrategia compartida a largo plazo que cubran las ambiciones de las PI. En esta fase, el uso de herramientas de modelado espacial

combinados con escenarios co-diseñados pueden ayudar a mejorar la conciencia, respaldar discusiones sobre ambiciones entre las PI, analizar la dinámica futura del paisaje y acordar planes de acción e inversión espacialmente focalizados. La fase c) se focaliza en la implementación de los planes de acción e inversión para lograr la visión compartida. Finalmente, la fase d) se centra en aprender de las acciones pasadas y en curso para mejorar la comprensión compartida, ajustar estrategias y planes de acción.

Las primeras dos fases del proceso de GIC fueron implementadas en la CALP en búsqueda de lograr una gestión integral sostenible de los recursos naturales. El estudio se focalizó sobre la parte alta de la cuenca de La Picasa para facilitar la implementación administrativa y organizacional del proyecto. Para ello se realizaron una serie de talleres con las PI que permitieron su acercamiento y discusión del estado actual y el co-diseño de escenarios posibles de gestión de la cuenca. También se adaptó una herramienta de modelación espacial que permitió la evaluación de los escenarios co-diseñados con las PI. Los objetivos de este trabajo fueron: a) evaluar el impacto ambiental, productivo y socio-económico de diferentes escenarios co-diseñados y, b) rescatar la visión y acuerdos alcanzados por las PI para la gestión de la CALP.

Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

La cuenca de La Picasa posee alrededor de 526.000 ha, ubicándose entre el sureste de la provincia de Córdoba, noroeste de Buenos Aires y sudoeste de Santa Fe (Figura 1). Esta región posee características climáticas, edáficas, hidrológicas, productivas y socioeconómicas representativas para la pampa húmeda y subhúmeda Argentina. Este estudio se focaliza sobre la porción oeste de la cuenca de La Picasa correspondiente al área ubicada en el territorio de Córdoba (245.000 ha). Esta delimitación arbitraria sobre la superficie de estudio se funda en la necesidad de restringir el área de estudio a una superficie posible de trabajar con el proceso de GIC y en donde hubiera datos de terreno suficientes para iniciar el proceso de modelación.

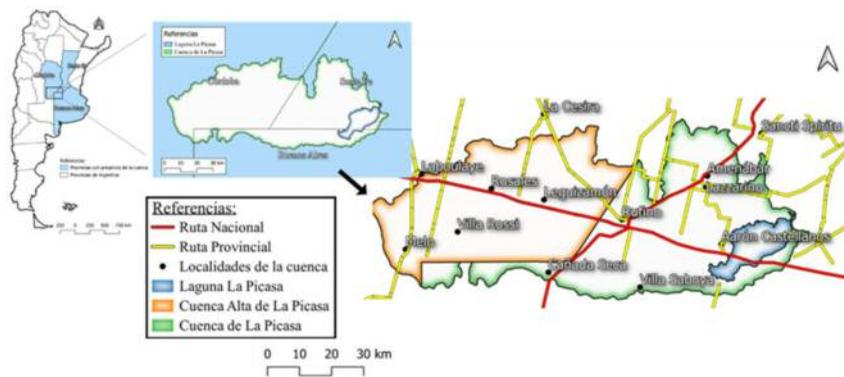


Figura 1. Localización de la cuenca La Pícala.

2.2. Talleres participativos con las partes interesadas

El proceso de GIC requiere la participación de los actores territoriales para el intercambio, entendimiento y generación de acuerdos que permitan alcanzar una visión común sobre la gestión de la cuenca. Para alcanzar los acuerdos sobre los planes y estrategias a implementar, el proceso de GIC se vale de herramientas de modelación que ayudan a pensar a las PI sobre posibles escenarios futuros con distintas prácticas de intervención sobre la cuenca (ver 2.3). Las PI en la CALP fueron instituciones privadas y públicas que representan el ecosistema del sector agropecuario, ciencia y tecnología y gobierno local y provincial. Las PI del sector agropecuario fueron representantes de Federación Agraria Argentina, Sociedad Rural Argentina, Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA), Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID), Cambio Rural, Colegio de Ingenieros Agrónomos de Córdoba, Regional de Consorcios Camineros de Córdoba y Productores Rurales Autocombocados del Sur de Córdoba (PRASCOR). El sector de ciencia y tecnología fue representado por la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto, escuelas rurales, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), y Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA). Los organismos locales y provinciales representados fueron Municipalidad de Laboulaye y localidades vecinas, Ministerio de Agricultura y Ganadería y Ministerio de Servicios Públicos.

En la CALP se realizaron tres talleres donde las PI pudieron exponer sus vivencias, opiniones y acordar los impactos sobre aspectos ambientales,

sociales y económicos (primer taller). En el segundo taller, las PI expusieron ideas para mitigar los impactos sobre el ambiente, la producción, la economía y la sociedad a partir de los cuales se co-diseñaron escenarios de modelación (ver 2.4). En el último taller se presentaron los resultados de las modelaciones de los escenarios co-diseñados y el cálculo de indicadores ambientales, productivos y económicos (ver 2.5). En este trabajo exponemos los resultados de los escenarios de modelación y las interpretaciones y conclusiones alcanzadas por las partes interesadas en el último taller.

2.3. Herramienta de modelación espacial

La herramienta de modelación construida consistió del acoplamiento de los modelos agrohidrológico SWAP-WOFOST (Kroes et al., 2017) y de aguas subterráneas iMOD (Vermeulen et al., 2021). Ambos modelos fueron parametrizados y calibrados para la región con datos de campo. Para ello se creó un sistema de información geográfica que permitió procesar los datos de entrada de meteorología, suelo, relieve, uso del suelo y cultivo (Videla-Mensegue et. al., 2022). El modelo SWAP – WOFOST fue calibrado para simular la fenología (días a floración y madurez fisiológica), rendimiento en grano e interceptación de radiación solar para los cultivos de trigo, soja y maíz (Macchiavello et. al., 2021). Los resultados de la calibración muestran un muy buen ajuste para la simulación de las etapas fenológicas (RMSE < 17 días y RRMSE < 9 %) y aceptable para el rendimiento en grano (RMSE < 1700 kg ha⁻¹ y RRMSE < 45 %) e interceptación de radiación (RMSE < 0.21 y RRMSE < 27%). El modelo iMOD fue calibrado con la profundidad de la capa freática observada durante el período 2009 – 2017 con datos mensuales en 2 lugares de la CALP (Laboulaye y Villa

Características	Actual	"+" Canales"	"+" Trigo/soja 2a"	"+" pasturas"
Uso del suelo agrícola	50% soja-soja, 30% maíz-soja, 20% trigo-soja 2a.	50% soja-soja, 30% maíz-soja, 20% trigo-soja 2a.	20% soja-soja, 30% maíz-soja, 50% trigo-soja 2a.	20% soja-soja, 30% maíz-soja, 30% trigo-soja 2a y 20% de pasturas.
Uso del suelo No agrícola	Pasturas implantadas y pastos naturales			
Infraestructura	133 km de canales	792 km de canales	133 km de canales	133 km de canales
Período de simulación	10 años	10 años	10 años	10 años

Tabla 1. Escenarios co-diseñados de uso del suelo e infraestructura de la cuenca alta de La Picasa.

Tabla 2. Indicadores usados para evaluar el efecto del cambio del uso del suelo e infraestructura en los escenarios modelados de la cuenca Alta de La Picasa.

Dimensión	Indicador	Unidad	Descripción
Ambiental	Intensificación del uso del suelo	%	Tiempo de ocupación del suelo con vegetación viva
	Recarga de la cuenca	mm/año	Cantidad de agua que recarga el acuífero
	Nivel freático promedio	cm	Variación del nivel freático
	Agua verde	%	Agua transferida por la vegetación como transpiración
Económico - productiva	Evapotranspiración de la cuenca	mm/año	Cantidad de salidas de agua a la atmósfera
	Producción equivalente soja	t/año	VBP expresado en cantidad de soja
	Valor bruto de la producción	US\$/año	Suma del valor económico de la producción

Rossi). Los resultados de la calibración mostraron un RMSE = 0,40 m y RRMSE = 5 % (López et al., 2022).

2.4. Codiseño de escenarios para la gestión integral de la cuenca

Los escenarios de modelación co-diseñados permitieron comparar distintas estrategias de gestión de los recursos naturales basados en cambios en el uso del suelo y la creación de infraestructura para el saneamiento hidrológico de la cuenca. A su vez, estos fueron comparados con la situación actual. Los escenarios co-diseñados evaluaron estrategias de intensificación en el uso de la tierra, a través de distintas rotaciones agrícolas y pasturas, e incremento de infraestructura hídrica basada en la construcción de canales.

La Tabla 1 muestra los escenarios para evaluar el efecto de cambios en el uso de la tierra, la infraestructura y la situación actual de la cuenca. El escenario "Actual" (E0) posee un uso del suelo en las áreas agrícolas de un 50 % soja, 30 % soja-maíz y 20 % trigo/soja 2a, y las áreas no agrícolas con pasturas y pastos naturales; y una infraestructura representada por 133 km de canales. En el escenario de "Incremento de infraestructura" (E1), se aumentó 500 % la superficie de canales (792 km de canales) y el uso del suelo agrícola y no agrícola se mantuvo igual al escenario

"Actual". El escenario de "Intensificación en las rotaciones agrícolas" (E2) propone un cambio de la ocupación de los suelos con un 20 % soja, 30 % soja-maíz y 50 % trigo/soja 2a en las áreas agrícolas, y mantener el uso de suelos de las áreas no agrícolas con pasturas y pastos naturales. Finalmente, el escenario de "Intensificación con pasturas en las áreas agrícolas" (E3), propone un cambio en la ocupación del suelo con un 20 % de soja, 30 % soja-maíz, 30 % trigo/soja 2a, y 20 % de pasturas de alfalfa en el área agrícola, y mantener el uso de suelo de las áreas no agrícolas con pasturas y pastos naturales.

2.5. Indicadores ambientales, productivos y socio-económicos

Los escenarios modelados fueron comparados en función de diferentes indicadores ambientales, productivos – económicos. Los indicadores usados fueron:

Resultados y discusión

3.1. Resultados de los escenarios de modelación

La Figura 2 muestra la variación porcentual de los indicadores ambientales y económico - productivos con respecto al E0 para la CALP. Los E2 y E3 (intensificación de uso de suelo) generaron mayo-



Figura 2. Variación porcentual de los indicadores ambientales y económico-productivos con respecto al escenario "Actual" calculados a partir de los escenarios de modelación de la cuenca alta de La Pícala.

res cambios en todos los indicadores en comparación a E0 y E1. El nivel freático medio fue el indicador que mostró mayor variación por los escenarios modelados (Figura 2). El E3 mostró mayor efecto sobre el nivel freático (178 cm) seguido por el E2 (NF medio 128 cm) y, en menor medida, el E1 (122 cm; Figura 3). La recarga de la cuenca fue el segundo indicador que mostró mayores cambios en los escenarios modelados (Figura 2). En el E0, la recarga media de la cuenca fue 123 mm.año⁻¹ mientras que los menores valores de recarga fueron logrados en el E3 (46 mm.año⁻¹) y E2 (100 mm.año⁻¹). El E1 no mostró efectos sobre la recarga de la cuenca.

La producción equivalente en soja y el valor bruto de la producción fueron afectados por los escenarios modelados, pero en menor magnitud que los anteriores. La producción equivalente en soja aumentó un 16 % en el E2 comparado al E0, variando de 908.000 t de soja/año a 1.055.000 t soja/año (Figura 2). Por el contrario, en el E3 se redujo un 11 % comparado al escenario E0 disminuyendo 102.000 t de soja/año. El valor bruto de la producción se comportó en forma similar al indicador anterior. El E2 aumentó un 16 % (37,8 millones de u\$) comparado al escenario E0 (232 millones de u\$, Figura 2). El E3 no logró compensar el rendimiento económico de los cultivos anua-

les de cosecha reduciendo el valor bruto de la producción en un 11 % significando 26 millones de u\$ menos generados en la cuenca (Figura 2).

Los restantes indicadores mostraron pequeñas variaciones entre escenarios modelados siendo los más notables la intensificación, la evapotranspiración de la cuenca y el agua verde transferida en la cuenca (Figura 2). En el E0, el agua evapotranspirada fue 830 mm.año⁻¹ siendo un 85 % transpirada por cultivos, 14 % evaporada y 1 % conducida por canales. En cambio, en el E3 y E2 la evapotranspiración fue 9 y 6 % superiores al escenario E0 (907 y 854 mm vs 830 mm, respectivamente; Figura 2). Si bien esta diferencia no parece tan importante, sí lo fue la transpiración siendo 20 y 6 % superior en el E3 y E2 en comparación al E0. En el E1 el movimiento de agua por canales aumentó un 400 % en comparación al E0 (datos no mostrados).

3.2. Reflexiones de las partes interesadas sobre los escenarios modelados

Los resultados de los escenarios de modelación y los indicadores mostrados en 3.1 fueron expuestos en el tercer taller participativo con las partes interesadas. Los intercambios de las partes interesadas expresaron tres grandes reflexiones: a) "el uso del suelo es un factor clave para gestionar el agua en la CALP", b) "la construcción de canales no tiene un impacto tan grande sobre la hidrología de la cuenca", y c) "la gestión de los recursos naturales de la cuenca requiere una solución integral: uso del suelo + manejo hídrico". Las partes interesadas resaltaron que el primer punto, si bien es muy importante para la gestión de la cuenca, ven dificultades para implementar una intensificación en el uso del suelo con pasturas debido a la reducción del resultado económico de las empresas y la necesidad de inversión en infraestructura en los campos. En cambio, propusieron como alternativa aumentar la superficie y mejorar el manejo de pasturas en los suelos bajos de la cuenca. Otra alternativa propuesta fue intensificar los suelos agrícolas con cultivos de servicio y/o forestación. En el punto b) se destaca la necesidad de evaluar el impacto de los reservorios que aumenten la capacidad de retención de agua en la cuenca.

Los intercambios de opiniones entre las PI sobre las experiencias de eventos extremos pasados y los resultados del modelado permitieron rescatar como

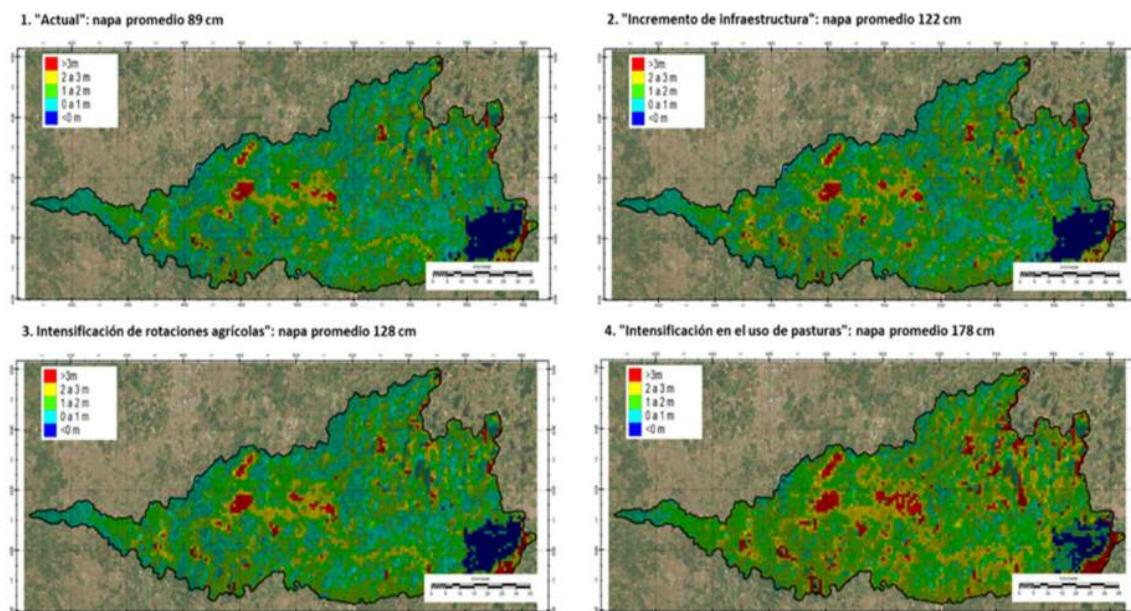


Figura 3. Nivel freático promedio y distribución espacial en el período de 10 años de la cuenca de La Picasa según el escenario de modelación “Actual” (1), “Incremento de infraestructura” (2), “Intensificación de rotaciones agrícolas” (3) e “Intensificación en el uso de pasturas” (4).

una idea común que para “la mitigación de los impactos negativos y el aprovechamiento de los recursos escasos, se necesita la participación conjunta de productores y actores del territorio para una gestión integral”. En este sentido, es sumamente importante comunicar y concientizar a la comunidad los conocimientos y aprendizajes con sustento técnicos y empíricos que las partes interesadas tienen para la GIC. Otro punto destacado fue la necesidad de medir y registrar datos que permitan evaluar la situación hidrológica de la cuenca en tiempo real.

Finalmente, el acuerdo logrado por las partes interesadas propone organizar un “comité de acción/equipo de gestión” público-privado con injerencia de actores locales, instituciones de gobierno y ciencia y técnica para generar un plan con visión de corto, medio y largo plazo para aplicar propuestas concretas de manejo agronómico e infraestructura para la gestión integrada de la cuenca alta de La Picasa.

Conclusiones

Los resultados del trabajo permitieron implementar una herramienta de modelación para evaluar el impacto de cambios en el uso del suelo y la

infraestructura sobre una serie de indicadores ambientales y económicos – productivos en la CALP. Los resultados mostraron que el incremento en la intensificación del uso del suelo, ya sea con pasturas o doble cultivo de cosecha, generan un importante efecto sobre el nivel freático, la recarga de la cuenca, la producción equivalente en soja y el valor bruto de la producción. Además, la intensificación con más infraestructura por aumento de la superficie con canales no genera impactos importantes sobre el nivel freático. Los talleres participativos permitieron a las partes interesadas crear y analizar escenarios de modelación co-diseñados que ayudaron a visualizar los impactos que generan cambios en el uso del suelo e infraestructura sobre aspectos ambientales y económicos – productivos. A partir de estos intercambios, las partes interesadas destacan la importancia del trabajo conjunto de productores y actores del territorio para la gestión integral de la cuenca haciendo foco en el uso del suelo, comunicación y concientización de la comunidad y medición de datos hidrológicos de la cuenca. Cabe aclarar que este trabajo se focalizó sobre la cuenca alta de La Picasa, en un posterior estudio es conveniente abordar la cuenca en su conjunto.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen el financiamiento del proyecto por parte del Ministerio de Agricultura y Ganadería y Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de Córdoba y los proyectos de INTA (2019-PE-E1-I011-001, 2019-PE-E2-I042-001 y 2019-PD-E2-I044-001).

Bibliografía

- Horn, S. van der y J. Meijer. (2015). The Landscape Approach, The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
- Laboranti, C. (2001). Laguna La Picasa. Instituto Argentino de Recursos Hídricos (IARH). Buenos Aires. <http://www.iarh.org.ar/>
- López, S.; Guillén, N., Romero, B.; Kroon, T.; Álvarez, J.; Videla-Mensegue, H.; Corigliano, J.; Macchiavello, A.; Veldhuizen, A.; y C.M. García. (2022). Avances en la modelación hidrológica del flujo de agua subterránea de la cuenca de la laguna La Picasa, Argentina. XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 07 AL 11 de noviembre de 2022. Foz de Iguazú, Brasil.
- Kroes, J.G., Van Dam, J.C., Bartholomeus, R.P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R.F.A., Mulder, H.M., Supit, I. y P.E.V. Van Walsum. (2017). SWAP Version 4, Theory Description and User Manual. Wageningen Environmental Research, ESG Report 2780. accessed on 7 May, 2018. <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/416321>.
- Macchiavello, A.; Videla Mensegue, H.; Kroes, J.G.; Veldhuizen, A.; Corigliano, J.; Kroon, T.; Romero Verastegui, B.; Alvarez, J.; López, S.; and N. Guillen. (2021). Calibración del modelo Swap-Wofost para simular cultivos agrícolas en la cuenca Alta Picasa (Argentina). 50 JAIIO-CAI. CABA. Argentina.
- Monti, M. y C. Riccomi. (2002). Proyecto Reconversión Productiva y Desarrollo Sustentable. Cuenca Laguna La Picasa. Ministerio de Agricultura, Ganadería, Industria y Comercio (MAGIC) de la Provincia de Santa Fe.
- Vermeulen, P.T.M., Minnema, B. y F.J. Roelofsen. (2021). iMod, User manual 5.3. Deltares. The Netherlands. <https://oss.deltares.nl/web/imod/user-manuals>.
- Videla Mensegue, H.; Corigliano, J.; Romero Verastegui, B.; López, S.; Kroon, T.; Alvarez, J.; Macchiavello, A.; Veldhuizen, A. y N. Guillen. (2022). ¿Cómo armar la estructura de datos necesarios para la aplicación de modelo de simulación dinámicos? XVI Jornadas IDERA: Córdoba. 28-29 de junio de 2022.

ISBN 978-631-00-0308-5



Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria

Secretaría de Agricultura,
Ganadería y Pesca



Ministerio de Economía
Argentina